

Atti di Convegno

SAFAP 2023

SICUREZZA E AFFIDABILITÀ DELLE ATTREZZATURE A PRESSIONE E DEGLI IMPIANTI DI PROCESSO

Brescia - 22, 23 e 24 novembre 2023

INAIL

2023



Atti di Convegno

The logo for INCIL, consisting of the letters 'INCIL' in white, bold, uppercase font, positioned on a solid gold-colored rectangular background.

INCIL

SAFAP 2023

**SICUREZZA E AFFIDABILITÀ DELLE
ATTREZZATURE A PRESSIONE E
DEGLI IMPIANTI DI PROCESSO**

22, 23 e 24 novembre 2023

Edizione 2023

Pubblicazione realizzata da

INAIL

Dipartimento innovazioni tecnologiche e sicurezza degli impianti,
prodotti e insediamenti antropici (Dit)

Editing

Francesca Ceruti

Daniela Gaetana Cogliani

per informazioni

INAIL - Dipartimento innovazioni tecnologiche
e sicurezza degli impianti, prodotti e insediamenti antropici
via Roberto Ferruzzi, 38/40 - 00143 Roma
dit@inail.it

www.inail.it

© 2023 INAIL
isbn 9788874848287

Gli autori hanno la piena responsabilità delle opinioni espresse nella pubblicazione, che non vanno intese come posizioni ufficiali dell'Inail.

Le pubblicazioni vengono distribuite gratuitamente e ne è quindi vietata la vendita nonché la riproduzione con qualsiasi mezzo. È consentita solo la citazione con l'indicazione della fonte.

INDICE

Sessione Progettazione e costruzione

G. Giannelli, N. Altamura, V. Galasso, A. Mele, M.F.S. De Musso

Approfondimento sulla costruzione ed esercizio in sicurezza di impianto di acqua surriscaldata alimentato dal calore dei pannelli solari, tra innovazioni tecnologiche e criticità normative..... pag. 1

F. Giacobbe, E.M. Carducci, F. Buti, L. Pugliese

Raccolta dei dati ed analisi statistica dei rilievi emersi nell'ambito della valutazione di conformità di attrezzature e insiemi a pressione..... pag. 15

L. Scano, L. Santi

Progettazione e certificazione PED di un impianto con reattore di carbonatazione operante in regime di creep-fatica..... pag. 28

R. Acerboni, N. Altamura, E. Bemporad, G. Gorrino, G. Vaccaro

Dalla costruzione all'esercizio in sicurezza dei recipienti criogenici fissi isolati sottovuoto. Casi studio..... pag. 43

F. Giacobbe, E. Bemporad

Nuovo approccio all'operatività degli organismi di valutazione della conformità alla PED alla luce dell'evoluzione delle modalità di accreditamento per scopi di notifica..... pag. 59

C. Puccini, L. Schoepflin, C. Ferri, S. Bonvicini, O. Borgia

Valutazione ingegneristica di alcuni aspetti del ciclo di vita degli impianti per il trasporto, lo stoccaggio e l'utilizzo di idrogeno..... pag. 70

V. Prete, G. Gorrino, M. Bortelli, G. Clerici, E. Portigliatti

Gruppi frigo ad ammoniaca: evoluzione della tipologia e dei criteri di progettazione dei sistemi di sicurezza in caso di rilascio..... pag. 86

G. Vaccaro, F. Moncini

Correlazione tra progettazione di attrezzature a pressione e normativa sugli spazi confinati..... pag. 98

Sessione Pericolo di incidenti rilevanti 1

G. Ancione, V. Bartolozzi, P. Bragatto, M. F. Milazzo

Esercizio sicuro di attrezzature critiche nella raffinazione di petroli ad elevato contenuto di zolfo: un approccio innovativo..... pag. 109

G. Ancione, P. Bragatto, R. Saitta, G. Fiumara

L'utilizzo della Realtà Aumentata per la gestione dell'invecchiamento delle apparecchiature critiche attraverso un Sensore Virtuale..... pag. 122

| | |
|---|----------|
| D. Di Fonzo, V. Bartolozzi, G. Augugliaro, G. Vaccaro, R. Lena Monitoraggio e controllo dei rischi legati all'invecchiamento dei liner anticor in PEAD rinforzati con fibre aramidiche, utilizzati nelle applicazioni di relining delle sea lines..... | pag. 134 |
| M.R. Vallerotonda, A. Andolina, E. Artenio, E. Bemporad, M. Borino, D. Di Fonzo, V. Galasso, M.F. Milazzo, F. Moncini, F. Palombo, A. Pirone, T. Vairo, F. Vazzana, C. Delle Site Piano di monitoraggio e controllo dei rischi legati all'invecchiamento di apparecchiature e impianti negli stabilimenti Seveso..... | pag. 146 |
| R. Setola, A. Chittaro, A. Cestari Security di una infrastruttura gas..... | pag. 159 |
| M. Del Gaudio, C. Piccolo, A. De Cristofaro, A.M. Ammendola, F. Vitobello Attrezzature a pressione a servizio di un simulatore di ageing su collettori solari..... | pag. 170 |
| C. Simeoni, A. Nebbioso, A. Di Francesco, P. Iacono Analisi congiunta dei settori "Seveso" e "Attrezzature a pressione": esame e approfondimento statistico dei dati istituzionali..... | pag. 181 |
| E. Tassinario, G. Franchino, M. Scelza, V. Prete, A. Urso, A. De Palma, A. Cicaterri, L. Gallerano Caso studio per l'applicazione della metodologia RBI nell'industria chimica, in uno stabilimento con pericolo di incidente rilevante..... | pag. 193 |

Sessione Analisi dei rischi

| | |
|--|----------|
| R. Setola, B. Fabiano, S. Ansaldo Analisi dei rischi emergenti connessi con la trasformazione digitale: il progetto DRIVERS..... | pag. 203 |
| F. Cucè, M. Cantone, R. Nicosia, R. Acerboni, F. Boella, A. De Palma, F. Rocchi Implementazione di un piano di gestione dei giunti flangiati imbullonati con interposta guarnizione negli impianti chimici e petrolchimici. Un approccio di "flange management" per la riduzione dei rischi..... | pag. 215 |
| G. Romano, A. Romano, A. Mormile Analisi di rischio per LNG carrier in area portuale con il supporto di metodologie avanzate: approccio combinato fluidodinamica computazionale (CFD) e analisi termostrutturale (FEM)..... | pag. 227 |
| R. Lauri, E. Incocciati, F. Valentino, B. Pietrangeli Applicazione di una metodologia di analisi dei rischi ad un modello di economia circolare finalizzato alla produzione di poliidrossialcanoati..... | pag. 241 |
| F. Pera, A. Pireddu, G. L. Amicucci, E. Del Prete Concentrazione di idrogeno in ambiente chiuso..... | pag. 253 |

D. Sallustio, F. P. Nigri

Applicazione del metodo HazOp e della tecnica LOPA per l'accettabilità del rischio di processo..... pag. 263

G. De Gennaro, D. Sallustio, F. Mele, A. Cocchiario

Studio di un sistema di «manutenzione predittiva» dei componenti di caldaia di una centrale elettrica alimentata da biomassa combustibile..... pag. 275

C. Piccolo, M.M. La Veglia, N.N. Pagano, M. Affinita, J. Pardi, D. Salzano

Gestione del rischio nell'ambito portuale..... pag. 289

Sessione Pericolo di incidenti rilevanti 2

C. Delle Site, E. Artenio, I. Mazzarelli

Valutazione di analisi post incidentali in occasione di ispezioni del Sistema di Gestione della Sicurezza..... pag. 306

F.M. Fabiani, S.M. Analdi

Interferenza fra attrezzature per lavori in quota e impianti di processo negli stabilimenti con pericolo di incidente rilevante..... pag. 320

M. R. Vallerotonda, A. Pirone

Incidenti e quasi incidenti originati da guasti elettrici negli stabilimenti Seveso..... pag. 334

F. Simone, P. Agnello, S. M. Analdi, G. Di Gravio, R. Patriarca, M. Tronci

Analisi della completezza dei report di quasi-incidente nella direttiva Seveso..... pag. 346

S. Carra, P. Agnello, L. Monica, C. Di Girolamo

Il ruolo dell'errore umano in incidenti e quasi-incidenti nei siti di stoccaggio di GPL: indagine ad ampio raggio tramite analisi di database incidentali..... pag. 358

F. Delli Quadri

Esplosione CVE ed incendio di vapori infiammabili durante svuotamento di serbatoio atmosferico – criticità delle operazioni di cambio/travaso di liquidi altamente infiammabili da serbatoio a serbatoio..... pag. 367

B. Conestabile della Staffa, A. Lambertini, R. Cerritelli, G. A. Zuccarello, L. Magnani

Principali elementi gestionali critici individuati nelle ispezioni dei SGS-PIR negli stabilimenti RIR ubicati nella provincia di Bologna..... pag. 382

A.J. Nakhal Akel, F. Simone, V. Franzoni, A. Alvino, S.M. Analdi, M.R. Vallerotonda, M.F. Milazzo, R. Patriarca

Un approccio sistemico per rappresentare la Direttiva Seveso III..... pag. 396

V. Prete, G. Gorrino, S. Manna, A. Urso, I. Briasco, P. Anesa, A. Brossa, N. Proietti, G. Odino

Studio finalizzato ad una diversificazione energetica integrata all'interno di uno stabilimento a rischio rilevante..... pag. 409

N. Mordà, C. De Simone

Curve di danneggiamento di SSC in ambito RIR: applicazione della teoria della dinamica aleatoria..... pag. 418

V. Nastasi, A. Muratore, M. Bellissimo, G. Giannelli, G. Grillone

Valutazione degli scenari di rischio a seguito di rilascio GPL negli stabilimenti con pericolo di incidenti rilevanti. Caso Studio..... pag. 434

Sessione Tecnologie di sicurezza

R. Marrazzo, G. Pinna, M. R. Vallerotonda, P. Bragatto

Le ispezioni di integrità attraverso la transizione digitale..... pag. 446

L. Di Donato, A. Ferraro, D. Freda, M. Pirozzi, L. Ricciardi, M. Venafro

De-energizzazione smart negli impianti di processo: l'esempio Eni..... pag. 459

L. Comel, R. Grasseti

Sistemi di rivestimento per l'ottimizzazione della durabilità e dell'efficientamento energetico di scambiatori di calore pag. 470

G. Giannelli, G. Grillone, N. Altamura, V. Nastasi, A. Muratore

La Conduzione dei generatori di vapore: tra realtà e realtà aumentata..... pag. 480

F. Giannini, K. Lupinetti, M. Monti, L. Mantelli, A. Traverso, G. Augugliaro, S. Anastasi, L. Monica

Una piattaforma immersiva per il training di certificatori e conduttori di generatori di vapore..... pag. 491

R. Marrazzo, F. Vazzana

Misure di riorganizzazione e continuità gestionale durante la pandemia: casi studio dalle ispezioni Seveso sull'industria di processo..... pag. 502

A. Romanelli, A. Serra, F. Praolini, M. Geneletti

Descrizione di un ciclo energetico totalmente green alla luce delle ultime evoluzioni tecnologiche..... pag. 511

L. Fiorentini, F. Dattilo, F. Vazzana

La gestione del rischio nello stoccaggio energetico mediante batterie agli ioni di litio: i rischi emergenti connessi con gli impianti BESS..... pag. 523

D. Sallustio, F. P. Nigri

Stima della probabilità di guasto su richiesta (PFD) con le relazioni semplificate dell'IEC 61508..... pag. 533

F. Giacobbe, C. Mennuti, E. Pichini, G. Rondinella, G. Pinna, F. Castorina, S. Geppetti, R. Calcagni

UNI/TS 11325-13 - Sistema di monitoraggio dei dati di esercizio di attrezzature a pressione..... pag. 545

G. Grillone, A. Muratore, R. Sunseri, S. Festa, V. Nastasi

Accumulatori idraulici installati negli aerogeneratori: misure di sicurezza per il controllo della pressione di esercizio..... pag. 553

Sessione Attrezzature e insiemi a pressione

C. De Toro, G. Battista, R. Luciano, F. Viola, F. Terzo

La gestione tecnica delle apparecchiature a pressione a servizio degli aerogeneratori eolici ed assoggettate al controllo obbligatorio di verifica e dichiarazione di messa in servizio (Artt. 4 e 6 del d.m. 329/2004)..... pag. 565

P. Addonizio, N. Pedicini, C. Barbarossa, A. Ferraro, N. Magnelli

Azienda – Istituzione è possibile collaborare? Un caso di successo nell'ambito delle attrezzature ed impianti in pressione..... pag. 573

E. Pichini, I. Mazzarelli, A. Tonti, E. Artenio, L. Tonarelli

Contenitori a pressione di gas con membrane miste di materiale isolante e di materiale metallico, contenenti parti attive di apparecchiature elettriche: le disposizioni nazionali (d.m. 1.12.1980) e l'evoluzione delle norme europee..... pag. 583

P. Bragatto, G. Ancione, M. F. Milazzo, E. Proverbio

Gestione dell'integrità dei serbatoi di stoccaggio atmosferico: alcuni risultati recenti..... pag. 598

E. Di Ponzio, A. Alvino, N. Altamura, A. Mele, F. Dibello

Strategie SW e tecniche HW di prevenzione dei danni metallurgici per surriscaldamento locale, di tubi catalitici in forni per steam reforming, correlato con le fasi di avvio e spegnimento del forno..... pag. 610

M. Giacobbo, R. Bordignon, F. Sudiro

La procedura di Lockout-Tagout (LOTO) applicata agli impianti di processo: una metodologia sicura per l'isolamento delle energie durante le fasi di manutenzione, riparazione, ispezione..... pag. 626

J. Ferino, I. Mazzarelli, A. Meleddu, E. Pichini

Caratterizzazione e accettazione di materiali in composito per attrezzature a pressione: setup della procedura sperimentale e primi risultati..... pag. 638

E. M. Ognibeni, L. Iori, P. Beber, A. Turri, M. Oss, G. Pilzer

Serbatoi GNL orizzontali, problematiche e soluzioni pag. 650

A. Rotondaro, A. F. Cosentini

Recipienti a pressione per stoccaggio gpl. Analisi mediante approccio statistico sui malfunzionamenti rilevati nelle installazioni e considerazioni sulla valutazione di conformità nei serbatoi soggetti a modifica..... pag. 662

Sessione Meccanismi di danno e interventi di riparazione

A. Falla, A. Blanco, G. Mugnioco, C. Percolla

La riparazione di attrezzature a pressione con materiali compositi a distanza di undici anni dall'emanazione del Decreto-Legge 22 giugno 2012, n. 83, "Misure urgenti per la crescita del Paese". Aspetti tecnici e normativi alla luce delle riparazioni eseguite e dei risultati ottenuti..... pag. 675

F. Rossetti, N. Palumbo, A. Serra, P. Tria

Riparazione e rimessa in esercizio del generatore di vapore a tubi d'acqua Macchi appartenente al Gruppo 3 della Centrale A2A Lamarmora di Brescia..... pag. 687

A. Antonini, A. Alvino, A. Tonti, S. Matera, O. Tassa

Evoluzione microstrutturale degli acciai grado 91 e 92. Lo studio dei precipitati come strumento per valutarne l'invecchiamento e la resistenza allo scorrimento viscoso..... pag. 697

A. Blanco, A. Falla, A. Lillo, A. Russo, R. Acerboni, F. Boella, A. De Palma, G. Saputi, E. Artenio

La riparazione di tetti di serbatoi utilizzando materiali compositi: aspetti tecnici e di sicurezza..... pag. 713

E. Pichini, I. Mazzarelli, M. Panciatici, M.M. Radici, C. Bolgiani

Analisi di difetti su generatori di vapore: rilievi di cricche trasversali, esame delle cause, provvedimenti adottati per l'esercizio in sicurezza..... pag. 722

F. Piccini, L. Scano

Valutazione dell'integrità strutturale di tubazioni in pressione: il caso di una condotta forzata realizzata nel 1940..... pag. 735

M. Giuffrida, C. Grazioli, M. Platania

Forni reforming catalitico: fenomeni di degrado su tubazioni in acciaio hp grade.... pag. 747

P. Traini, N. Palumbo, F. Rossetti

L'approccio analitico per la sostituzione, mediante riparazione, di una tubazione munita di liner interno di protezione, facente parte di un sistema di desurriscaldamento vapore: l'esperienza di un Generatore di Vapore a Recupero di un Ciclo Combinato..... pag. 760

Sessione Rischio NaTech

F. Geri, S. Pantanella, C. Raimondo, E. Sampino, S. Tafaro

Importanza della "preparedness" nella gestione degli eventi Natech nell'ambito degli stabilimenti PIR..... pag. 774

S. Campana, R. Iovene, R. Vasile

Valutazione del rischio NaTech di tipo idrogeologico per le condotte di trasporto di sostanze pericolose..... pag. 788

M. Salimbeni, M. De Angelis, V. Vezzari, M. Ciucci

Valutazione e gestione del rischio NaTech da sisma per serbatoi atmosferici a tetto galleggiante in stabilimenti industriali con Pericolo di Incidente Rilevante..... pag. 798

A. Marino, G. J. O'Reilly, P. Dubini, F. Dacarro, S. Mascetti

Navigazione Risk-Aware in impianti industriali PIR a rischio di incidenti NaTech..... pag. 810

G. Romano, S. Colombo, F. Chillè, D. Ardivino

Analisi NaTech Sisma per impianti a rischio di incidente rilevante: applicazioni operative con il supporto della tecnologia "Scan3D to FEM"..... pag. 822

A. Marino, G. Berardo, A.C. Lio, Mariano Ciucci
Valutazione e gestione del rischio NaTech da Eventi Idrogeologici..... pag. 833

A. Muratore, V. Nastasi, C. Delle Site, G. Grillone, G. Giannelli
Metodo ad indice per la stima del rischio alluvioni per le attrezzature a pressione.... pag. 845

Sessione Diagnostica

D. Bogomolov, E. Burda, S. Mariani, M. G. Gaeta, N. Testoni, C. Mennuti, G. Augugliaro, A. Marzani
Approccio basato sull'entropia del segnale per la stima dei tempi di arrivo delle emissioni acustiche nel monitoraggio delle apparecchiature a pressione..... pag. 858

M. Reggiani
La nuova UNI EN ISO 9712:2022 – Prove non distruttive – Cosa è cambiato?..... pag. 861

G. Augugliaro, F. Brini, L. Bruzzo, C. Mennuti, P. Quaresima
Detezione di difetti artificiali in tubazioni in polietilene ad alta densità..... pag. 876

L. Ricciardi, R. Marchetto, E. Schiesaro
Tecnologia a raggi cosmici per la ricerca di perdite di idrocarburi da condotte interrato..... pag. 885

D. Sallustio, E. Mazzi, S. Larghi
Economizzatore a bassa temperatura (LLTE), una soluzione flessibile nella transizione energetica..... pag. 895

C. Di Girolamo, S. Carra, L. Monica, A. Tonti
Criteri di applicabilità di metodologie alternative o complementari alla prova idraulica su attrezzature a pressione..... pag. 905

A. Fiodo, A. Alvino, E. Di Ponzio, D. Lega, A. Antonini
Le principali forme di danno nei forni di steam reforming: caratterizzazione e metodologie diagnostiche..... pag. 916

A. Mura, A. Rubinato, M. De Martin, M. Bonetto, D. Realdon
Utilizzo di dispositivi mobili per l'attività di monitoraggio dello stato degli impianti.... pag. 931

C. Andenna, D. Lega, C. Mennuti
Metodi di stima della vita residua di tubazioni in polietilene: una review pag. 942

F. Rossetti, N. Palumbo, A. Serra, D. Airoidi
Verifica d'integrità decennale di un generatore di vapore a tubi d'acqua al servizio della linea 1 del Termoutilizzatore A2A di Brescia..... pag. 953

N. Pedicini, M. Faiella, C. Liccardo, L. Tassan Pagnochit, A. Cocchiaro
Analisi dei meccanismi di corrosione di un surriscaldatore di vapore all'interno del termovalorizzatore di Acerra..... pag. 963

R. Cozza
Fattore di danno da creep secondo le metodologie di riferimento API 581..... pag. 971

Sessione Strumenti per la sicurezza

F. Ceruti, D.G. Cogliani, C. Delle Site, A. Nebbioso

Repository Safap: il database degli articoli..... pag. 983

F. Pastoret, G. Gorrino, S. Manna, A. Urso, S. Spinoso

Centrale di teleriscaldamento alimentata a combustibile solido. Caso studio..... pag. 995

M.P. Gatto, C. De Toro, I. Campitelli, R. Di Leo, G. Selvestrini

Incidenti rilevanti connessi con sostanze pericolose: rilevazione ed identificazione chimica *on site*..... pag. 1004

G. Vaccaro, M. Torres, F. Moncini, D. Di Fonzo, F.P. Sofia

Installazione ed esercizio dei depositi di gas di petrolio liquefatto con capacità complessiva non superiore a 13 m³..... pag. 1017

M.N. Tini, M.A. Palazzi, A. Dubbini, P. Grilli, G. Cristiano, E. Manna

L'integrazione dell'analisi dei rischi derivanti da attacchi informatici nel Sistema di Gestione della Sicurezza degli Stabilimenti RIR pag. 1029

F. Petrosino, G. Marino, I. Campitelli, O. Di Donato

Criticità operative nella gestione degli impianti di aria compressa del Centro Italiano Ricerche Aerospaziali..... pag. 1046

R. Mercurio, A. Mercurio, G. Paglione, A. Turi, G. Piva

Analisi e individuazione delle cause che hanno prodotto lo scoppio di un generatore di vapore a tubi da fumo a fondo bagnato..... pag. 1054

N. Palumbo, E. Bemporad, G. Gurnari

Background delle formule per il calcolo della deformazione di membrane di attrezzature a pressione..... pag. 1067

P. Addonizio, E. Opromolla, N. Pedicini, L. Tassan Pagnochit, A. Baccichet, A. Cocchiaro

Analisi descrittiva e verifica sperimentale delle catene di sicurezza (safety loops) a protezione di un generatore di vapore del termovalorizzatore di Acerra..... pag. 1083

L. Carta, M. Maurino

Innovazione tecnologica negli impianti di riscaldamento ad Acqua Calda: Telegestione degli impianti con sistemi di espansione a vaso prepressurizzato e Sistemi di sicurezza integrativi telegestiti..... pag. 1096

R. Modestino, M. P. Gatto, G. Aversa, D. Strollo, G. Florida

Aria compressa nell'azienda vitivinicola, usi innovativi per le produzioni di alta qualità..... pag. 1108

R. Iovene, R. Vasile, A. Morettini

Rischio Legionella in impianti per la produzione di acqua calda ad uso sanitario..... pag. 1117

M. del Gaudio, R. Modestino, C. Festa, J. Pardi

Sicurezza nell'utilizzo di serbatoi GPL..... pag. 1130

S. Anastasi, F. Ceruti, P. De Cillis, C. La Gioia, R. Modestino, V. Mordanini, A. Nebbioso, L. Ricciardi

Il Technical Repository: modello di gestione digitale di flussi documentali relativi alle attrezzature a pressione..... pag. 1144

M. Babbo, P. Morucchio, R. Acerboni, J. Longo, G. Saputi

Testo Unico sulla salute e sicurezza sul lavoro d.lgs. 81/08 art. 71 e del d.m. 11 aprile 2011. Panoramica relativa alle denunce delle attrezzature/insiemi a pressione. Operatività nelle attività di riqualificazione periodica, formazione e informazione delle figure della sicurezza..... pag. 1156

D. Sallustio, G. De Gennaro, G. Ianziti, M. Guerrieri

Analisi di stabilità dei sistemi di sicurezza: confronto tra le normative EU ed extra EU..... pag. 1162

C. Grazioli, P. Sergi

Esercizio di generatori di vapore con almeno 45 anni di vita: considerazioni su casi studio..... pag. 1174

R. Iovene, R. Vasile, C. Pagano, M. Di Giacomo

Centrale Termoelettrica di Gissi (CH) – HP Interstage DSH..... pag. 1186

A. Carro, M. Quadalti

Intervento di riparazione di un debenzinatore per olio alimentare.....pag. 1198

F. Ciancetta, S. Mari, G. D'Ovidio, R. Iovene, R. Vasile

Progettazione preliminare e analisi dei rischi associati alla diffusione delle tecnologie a celle a combustibile nel settore dei trasporti, finalizzati allo sviluppo di una Hydrogen Valley..... pag. 1206

V. Prete, A. Urso, A. De Palma, S. Manna, A. Colautto, L. Viarengo, M. Fischetti, G. Odino

Revamping di un impianto di compostaggio con produzione di biogas ed adozione di un sistema di Upgrading per minimizzare gli autoconsumi elettrici e massimizzare il tasso di recupero del metano..... pag. 1219

A. Carro, M. Quadalti

Interventi di riparazione in generatori di vapore con fumi particolarmente aggressivi (termovalorizzatori, biocombustibili)..... pag. 1228

P. Amodeo, G. Argento, F.P. Sofia, G. Sunseri

I sistemi di protezione dalle scariche atmosferiche negli edifici e costruzioni contenenti depositi di sostanze esplosive o nei quali si lavorano o si manipolano sostanze esplosive..... pag. 1236

Approfondimento sulla costruzione ed esercizio in sicurezza di impianto di acqua surriscaldata alimentato dal calore dei pannelli solari, tra innovazioni tecnologiche e criticità normative

G. Giannelli¹, N. Altamura², V. Galasso³, A.Mele⁴, M.F.S. De Musso⁵

¹ Inail - Uot di Como

² Inail - Uot di Bari

³ Inail - Uot di Taranto

⁴ Inail - Uot di Taranto

⁵ Inail - Uot di Bari

Abstract

La spinta all'utilizzo di tutte le fonti rinnovabili per alimentare anche gli impianti industriali ha accelerato la ricerca e l'utilizzo di nuove tecnologie destinate a capitalizzare al meglio le fonti naturali con il conseguente aumento dei rendimenti energetici.

In questo contesto molti impianti esistenti adibiti alla generazione e distribuzione del calore per i diversi processi industriali sono stati oggetto di operazioni di revamping e implementazione, con il conseguente miglioramento sia in termini di rese energetiche e sia in termini di abbattimento delle emissioni inquinanti.

Prendendo spunto da un caso reale di recente installazione, nella memoria si sono esaminati gli aspetti afferenti sia la sfera della costruzione e sia della gestione dell'esercizio di un impianto di acqua surriscaldata realizzato per implementare gli impianti di acqua calda e di vapore di uno stabilimento produttivo di bevande.

Un aspetto che sicuramente emerge dallo studio è un ritardo normativo, che in futuro ci si auspica di colmare. Tale ritardo porta da una parte ad una limitazione dello sfruttamento delle potenzialità tecnologiche-ambientali degli impianti e dall'altro a non poter utilizzare strumentazione atta ad innalzare i livelli di sicurezza degli stessi. In definitiva è risultato quasi doveroso attenzionare le criticità emerse e rubricare una serie di proposte di carattere tecnico/normativo, senza tuttavia alterare lo status attuale dei riferimenti legislativi che seppur modificati ed integrati nel tempo, fanno chiaro riferimento a fonti energetiche di tipo fossile.

Keywords: fonti rinnovabili, pannelli solari, acqua surriscaldata.

1. Sintesi del quadro normativo

Attualmente, la norma di legge di primo riferimento è il d.m. 1° dicembre 1975.

In particolare, il Titolo I°, Capo I° riguardano le norme di sicurezza per gli apparecchi contenenti anche l'acqua surriscaldata; infatti il Titolo I° si riferisce a "Liquidi caldi sotto pressione con temperatura superiore a quella di ebollizione a pressione atmosferica", comprendendo tutti gli impianti di liquidi surriscaldati e i forni industriali.

Il Titolo II° del d.m. 1° dicembre 1975, al contrario si occupa dei "Liquidi caldi sotto pressione con temperatura inferiore a quella di ebollizione a pressione atmosferica", connotando l'applicazione prevalentemente agli impianti di riscaldamento o semplicemente di acqua calda.

Infine, il Titolo III° sempre dello stesso d.m., oltre a regolamentare l'esercizio degli impianti già in essere nel 1975, incaricava l'ANCC (Associazione Nazionale per il Controllo della Combustione, confluita nell'Ispesl dal 1982 e poi nell'Inail dal 2010) di "emanare" le specificazioni applicative, costituite dalla Raccolta "R" (la più recente è del 2009) per il Titolo II° e dalla Raccolta "H" ed "F" per il Titolo I°.

Il dm 1 Dicembre 1975, pur rimanendo ancora in vigore, fa a sua volta riferimento ad una normativa che per alcuni aspetti risulta superata dalla legislazione europea sia in termini di esercizio e sia in termini di costruzione di impianti ed apparecchi in pressione (es. R.D. 824/19727 e d.m. 21.11.1972); inoltre, con l'entrata in vigore del d.m. 329/04 (con esattezza dal 12.05.2005) in materia di esercizio degli impianti ed apparecchi in pressione, sono state pubblicate le afferenti norme UNI della serie 11325, che dovranno costituire le nuove specifiche tecniche a cui far riferimento per la costruzione e l'esercizio anche degli impianti di vapore e acqua surriscaldata, così come richiesto dall'articolo 3 dello stesso d.m. 329/04 (es. UNI/TS 11325/10 pubblicata il 18/10/2018 e la UNI/TS 11325/3 pubblicata il 03/11/2021) non appena le stesse saranno "approvate" anche dai Ministeri competenti (Ministero delle Attività produttive e Ministero del Lavoro e delle politiche sociali).

L'edizione dell'attuale Raccolta H, risale al 1982 per diretta emanazione dell'ANCC, e pertanto al momento, per quanto non in contrasto con la normativa europea e nazionale, solo tale raccolta ha carattere cogente, mentre le suddette norme UNI sono di applicazione volontaria.

La Raccolta è composta da 10 capitoli che trattano argomenti che vanno dalle disposizioni generali fino agli apparecchi contenenti bagni per tintura, passando dai sistemi di espansione e dispositivi di sicurezza.

In particolare, si evidenzia come nel capitolo H1, la generazione di acqua surriscaldata è affidata fondamentalmente a due tipologie di apparecchi come i generatori di acqua surriscaldata (funzionanti ed equiparati ai generatori di vapore) e gli scambiatori di calore, fermo restando l'opportunità di utilizzare altri sistemi da far approvare al Consiglio Tecnico dell'ANCC.

2. Pannelli solari come generatori di acqua surriscaldata

Si premette che gran parte dell'attuale normativa tecnica, come ad esempio la serie delle norme EN 12977 è principalmente riferita alla realizzazione di impianti solari

termici per la produzione di acqua calda sanitaria (acs). Tuttavia, vi sono norme come la ISO 9806: 2013, la ISO 9488: 2022 e la ISO 9060: 2018, che indipendentemente dalle caratteristiche del fluido vettore, permettono la misurazione delle prestazioni del pannello; e in tale contesto un ruolo fondamentale viene giocato dalla pressione e temperatura di progetto del collettore solare, oltre ai molteplici fattori geometrici ed ambientali.

Considerando ora che per l'utilizzo industriale di acqua surriscaldata le pressioni non superano i 30 bar e che le temperature richieste non vanno oltre i 250 °C, molti costruttori realizzano collettori composti da tubi con diametro massimo di 1" in acciaio inossidabile. Al contrario, per l'acs le pressioni e le temperature di esercizio sono inferiori e rendono più semplice la costruzione dei pannelli. Infatti, un pannello solare adibito al riscaldamento diretto di acqua, detto comunemente pannello solare termico, è generalmente composto da un recipiente bollitore con entrata di acqua fredda ed uscita di acqua calda, collegato ad un sistema di captazione dell'energia solare, composto generalmente da una tubazione in serpentino che prende il nome di collettore.

Un classico schema di pannello singolo per acs è rappresentato dalla Figura 1, mentre in Figura 2 è rappresentato lo schema tipico di impianto domestico di acs, in cui si evince la funzione ausiliaria del pannello solare termico. Infatti, in tali impianti l'istantaneità della produzione dell'acqua calda è sempre data dalla caldaia, mentre il preriscaldamento dell'acqua calda e quindi l'importante vantaggio termico è assicurato dall'accumulo della stessa all'interno del boiler.

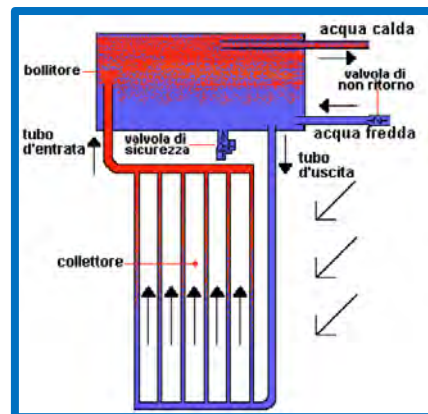


Figura 1. Schema di pannello solare termico

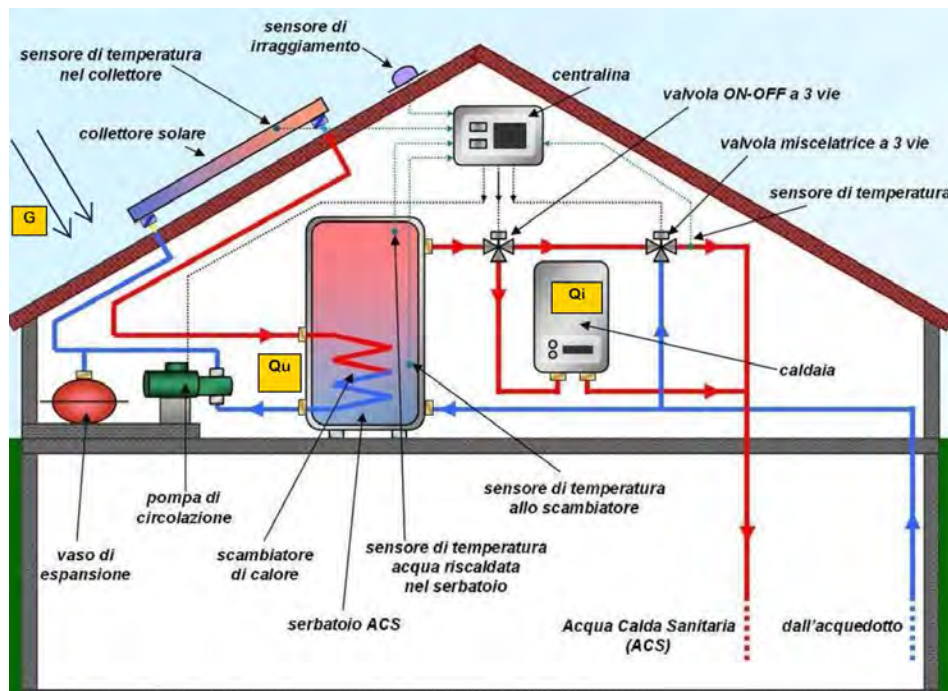


Figura 2. Schema impianto solare termico con circolazione forzata

Se si assume per:

- "G" : la potenza di irraggiamento diretto per unità di superficie (espressa in W/mq);
- "A" : l'area della superficie del pannello;
- "Qu": la potenza a disposizione del boiler di accumulo,

il rendimento "η" di un pannello solare termico sarà semplicemente ottenuto dalla seguente relazione (1):

$$\eta = \frac{Q_u}{A G} \quad (1)$$

Tale rendimento però non sarà costante ma dipenderà dalla differenza di temperatura che esisterà fra l'ambiente esterno al pannello ("Ta") e il fluido vettore circolante ("Tp"). Infatti se con "K" (unica costante) si indicherà la dispersione fra il fluido vettore e l'ambiente esterno quando la differenza di temperatura fra i due fluidi (aria e termovettore) sarà pari ad 1 °K, per tener conto di ciò si introdurrà un coefficiente "δ" dato dalla relazione (2):

$$\delta = \frac{K (T_p - T_a)}{G} \quad (2)$$

Stabiliti allora "K", "δ", e il parametro sperimentale "b", il termine "h", partirà da un valore massimo "a", che si potrà raggiungere solo quando Tp sarà uguale a Ta (cioè δ =0), da cui seguirà una relazione lineare di diminuzione in funzione di un parametro "b", così come segue:

$$\eta = a - b \delta \quad (3)$$

Da quanto sopra si deduce che la potenza utile Q_u potrà al massimo essere uguale al valore " a x 100" (espresso in percentuale) di quella massima " A * G" captata dal pannello.

Un esempio di diagramma del rendimento è raffigurato sotto nella Figura 3:

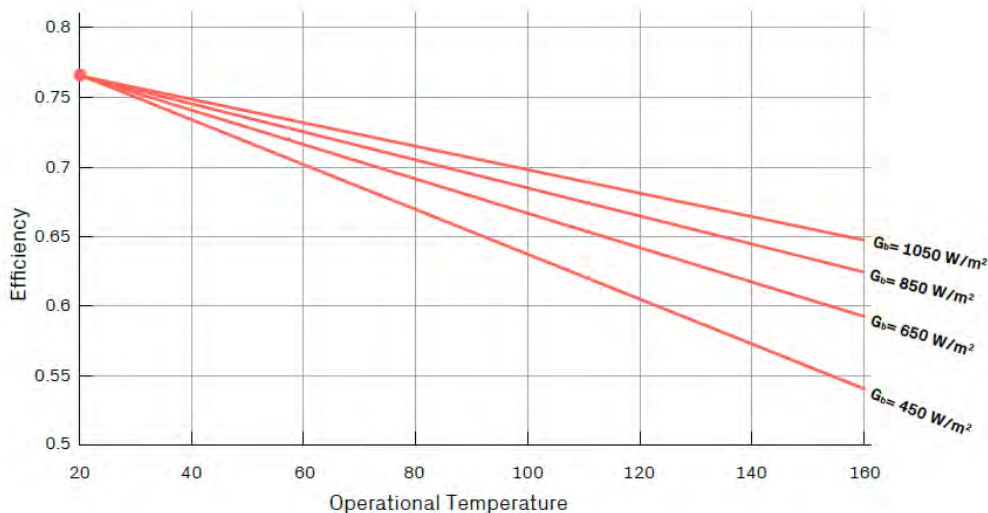


Figura 3. Rendimento di un pannello solare termico in funzione di T_p e G

Ora, se la relazione generale del bilancio energetico di un pannello solare termico sarà:

$$A G = Q_u + Q_{po} + Q_{conv} + Q_{cond} + Q_{rad} \quad (4)$$

Con:

- Q_{po} = perdite ottiche;
- Q_{conv} = perdite per convezione;
- Q_{cond} = perdite per conduzione;
- Q_{rad} = perdite per radiazione

risulterà evidente che dei buoni pannelli solari termici saranno costruiti per ridurre al minimo tali perdite e aumentare al massimo " Q_u ". In tale contesto il mercato offre diverse soluzioni, come i pannelli con i tubi sottovuoto, utilizzo di vetri antiriflesso, oppure isolamenti efficienti della struttura di supporto.

A prescindere dalla bontà del singolo pannello in termini di rendimento, deve rimanere chiaro che l'utilizzo degli stessi per la produzione di acqua surriscaldata è tuttavia legato al contenuto termico necessario alle utilities. Per tale scopo sono fondamentali i seguenti parametri:

- Temperatura di mandata dal circuito e afferente contenuto termico di 1 Kg di acqua;
- Temperatura di ritorno al circuito e afferente contenuto termico di 1 Kg di acqua;

- La portata "q" di acqua circolante.

Se i primi due parametri sono fissati dalla natura e poi dal progettista dei pannelli solari termici, l'unico parametro che ci permette di variare l'apporto termico alle utilities sarà la portata di acqua circolante e quindi sostanzialmente il numero dei pannelli solari termici da gestire. Se dalla figura 3 si considerasse la G_b più bassa di 450 W/mq e un'estensione di superficie irradiata totale di 1000 mq, teoricamente avremo una potenza totale di incidenza pari a 450KW, che ovviamente si ridurrà all'utilizzo in funzione del rendimento (Efficiency), a sua volta funzione della temperatura di mandata: aumentando la temperatura di mandata, diminuisce l'efficienza. Infatti, per una Temperatura di mandata di 160 °C il rendimento sarà di 0,54 e quindi alle utilities saranno a disposizione solo 243 KW (450 x 0,54). Se, invece, alla stessa temperatura di mandata si avesse a disposizione una potenza di irraggiamento G_b pari a 1050 W/mq, e quindi a parità di superficie una potenza totale di 1050KW, considerando un rendimento di 0,66, la potenza utile totale alle utilities sarà di 693KW (1050 x 0.66).

Fissando quindi la massima potenza utile a disposizione per le utilities in funzione sia delle esigenze produttive e sia dei vincoli di sicurezza, non risulterà difficile pensare che attraverso la regolazione dell'angolazione dei pannelli solari termici si potrà regolare anche la potenza di irraggiamento diretta incidente G_b .

Da quanto sopra si evince una intrinseca relazione tra "q" e " G_b " e l'inevitabile realizzazione di una precisa logica di gestione che di base dovrebbe prevedere la seguente sensoristica:

1. Sensori di irraggiamento, solitamente in monocristallo di silicio che permettono di rilevare in W/mq la potenza in arrivo dei raggi solari, capaci di lavorare nell'intervallo di temperatura di -35/+80°C, con vento fino a 40 m/sec, e possono rilevare fino a 1500 W/mq. ;
2. Sensori di temperatura, possibilmente in acciaio inox capaci di rilevare nell'intervallo -50/+260°C;
3. Sensori di inclinazione;
4. Sensori di umidità;
5. Sensori per la velocità del vento, capaci di misurare velocità fino a 40 m/sec.

3. Altri componenti del circuito di acqua surriscaldata alimentato da pannelli solari termici

In linea generale l'impianto di acqua surriscaldata alimentato da pannelli solari termici rispecchierà l'andamento di un impianto di acqua surriscaldata classico. Le strutture principali saranno:

- Generatore di calore costituito da "n" pannelli solari termici collegati in serie fino a raggiungere una superficie congrua per le esigenze produttive;
- Vaso di espansione o batteria di vasi di espansione congrua al contenuto di acqua circolante;

- Sistema di pressurizzazione agente sul vaso di espansione, possibilmente costituito da alimentatore ad azoto;
- Impianto di trattamento delle acque di integrazione;
- Tubazioni di collegamento con punti di integrazione e scarico acque;
- Sensoristica;
- Accessori in pressione;
- Accessori di sicurezza;
- PLC di gestione delle logiche di esercizio e di sicurezza;
- Impianto elettrico;
- Eventuale impianto di aria compressa per attuatori elettropneumatici.

Considerati i volumi di acqua che saranno richiesti per avere una idonea energia termica per uso industriale, il calcolo del vaso di espansione e del sistema di pressurizzazione dovranno essere molto dettagliati e adeguati a valle della installazione. Infatti, in questo caso, moltissima attenzione dovrà farsi per il peso specifico dell'acqua alle varie temperature di esercizio e al mantenimento perfetto delle pressioni all'interno dell'intero circuito al fine di evitare dannose e pericolose vaporizzazioni dell'acqua.

4. Analisi dei Rischi

A prescindere dagli obblighi imposti dalla normativa di legge, attualmente l'analisi dei rischi afferente gli impianti di acqua surriscaldata alimentati da energia solare dovranno inevitabilmente comprendere le analisi e le valutazioni riguardanti dispositivi non previsti dalla normativa, ed in particolar modo la loro efficienza e affidabilità.

Un esempio potrebbe essere il banale funzionamento del sistema di inclinazione dei pannelli solari termici: infatti sintetizzando al massimo l'analisi, l'accensione e lo spegnimento del generatore di calore per acqua surriscaldata dipenderà dal corretto funzionamento di tale dispositivo. A sua volta tale dispositivo agirà in funzione di comandi generati da altri sensori, primo fra tutti il sensore di irraggiamento.

Il tipo di analisi dei rischi da applicare agli impianti industriali di acqua surriscaldata alimentata da fonti rinnovabili dipenderà anche dal tipo di utilities da alimentare. Infatti, la complessità dell'analisi sarà funzione della complessità dell'impianto di utilizzazione e non della sola componente di produzione di acqua surriscaldata.

Come esempio di caso studio prendiamo in considerazione un impianto solare termico di acqua surriscaldata realmente esistente destinato alla produzione di vapore ausiliario e di integrazione all'impianto principale di produzione vapore, nonché produzione di acqua calda per accumulo in recipiente avente funzione di volano termico, in cui sono stati utilizzati 120 pannelli solari termici per un'area netta di 661,2 mq, con una produttività massima di 470 KW, e avente le seguenti caratteristiche di progetto:

- Temperatura di ingresso dalla centrale dei pannelli solari: 169,8 °C;
- Temperatura di uscita dalla centrale dei pannelli solari: 163,8 °C;

- Pressione massima di esercizio: 8 bar;
- Portata massima in circolazione: 1183 litri/min;
- Pressione di apertura della valvola di sicurezza del vaso di espansione: 9,5 bar;
- Temperatura massima raggiungibile nel circuito e nel vaso di espansione: 180°C;
- Contenuto di acqua nel circuito totale primario: 2800 litri;
- Volume massimo di espansione consentito in esercizio: 509 litri;
- Volume totale del vaso di espansione : 1400 litri.

Una funzione fondamentale nell'intera logica di funzionamento la eseguono le valvole a tre vie che sono opportunamente comandate per distribuire i flussi di acqua surriscaldata, senza considerare l'importante corretto funzionamento di tutti i trasduttori di pressione, temperatura e portata.

Per un tale impianto il sistema più adatto di analisi dei rischi è quello Hazop, in cui ci devono essere i seguenti elementi di base:

1. Disegni ben numerati ed aggiornati di ogni impianto e parti di esso, contenenti anche i riferimenti a disegni contigui;
2. Corretta denominazione degli Item di ogni componente, qualsiasi esso sia;
3. Data sheet di ogni componente;
4. Individuazione dei nodi di analisi dei rischi;
5. Individuazione di sottonodi o sheet per ogni nodo di analisi dei rischi;
6. Per ogni nodo l'elenco dei fattori di pericolo da prendere in considerazione;
7. In riferimento ad ogni sheet eseguire una tabella con cause, scenari, conseguenze, sistemi di protezione e raccomandazioni;
8. Eseguire una tabella di raccomandazioni unica con riferimenti da richiamare nelle tabelle del punto precedente.

I nodi presi in considerazione sono stati riferiti a (vedi Tab.2):

- I. Impianto primario di acqua surriscaldata (Main Skid);
- II. Impianto secondario per acqua calda con volano termico per utilities dell'utilizzatore (Feed Water Skid);
- III. Impianto secondario di generazione di vapore per integrazione all'impianto dell'utilizzatore (Steam generatio Skid);
- IV. Impianto di fornitura azoto per pressurizzazione del vaso di espansione e del volano termico (Storage Skid).

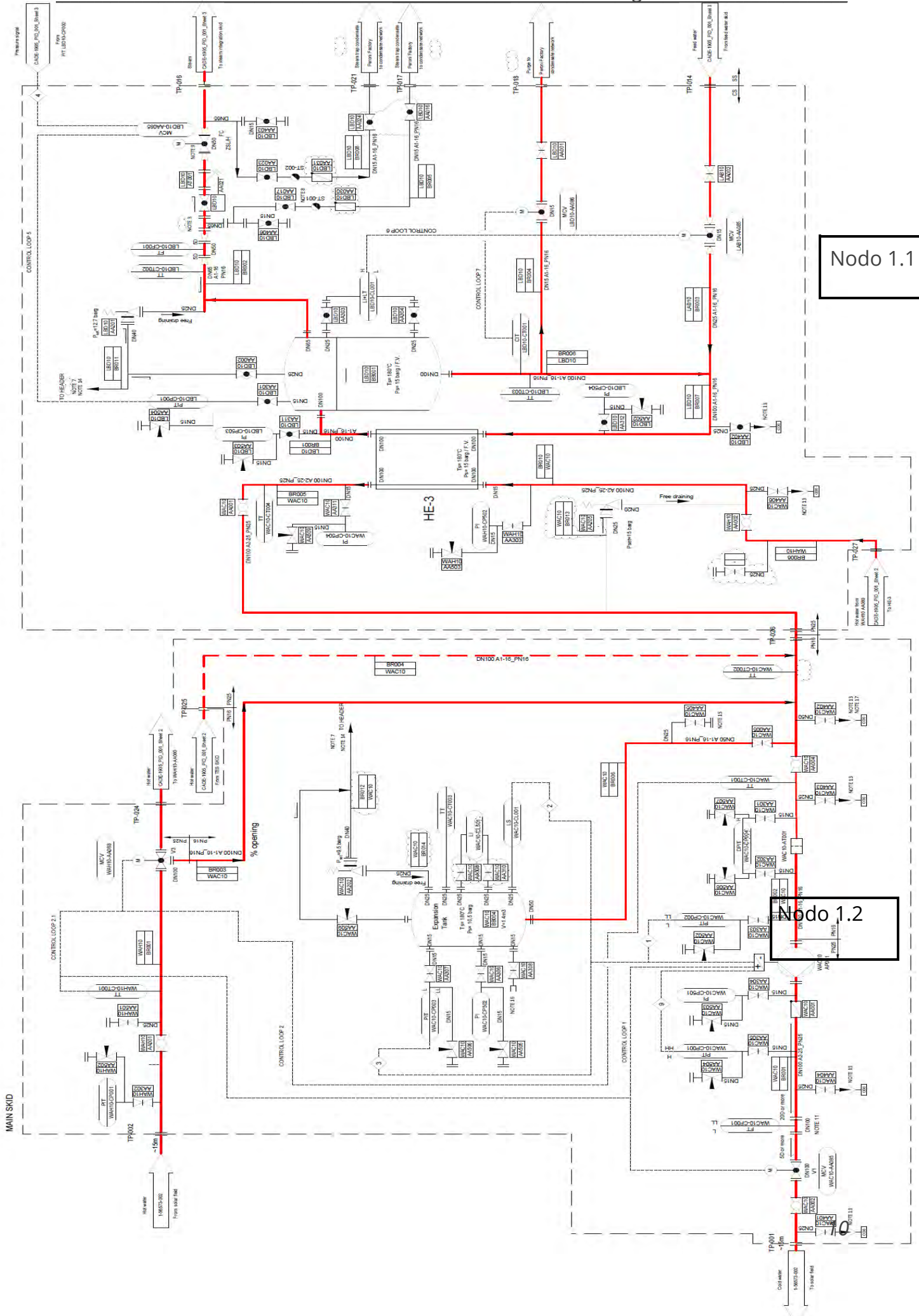
Mentre i sottonodi o sheet sono elencati nella seguente tabella 1:

| NUMERO DEL NODO | NODO 1 | NODO 2 | NODO 3 | NODO 4 |
|-----------------|----------------|----------------|-------------|----------------|
| SOTTONODO/SHEET | 1.1 (SHEET 1) | 2.1 (SHEET 1) | 3 (SHEET 2) | 4.1 (SHEET 1) |
| SOTTONODO/SHEET | 1.2 (SHEET 2) | 2.2 (SHEET 2) | | 4.2 (SHEET 2) |
| SOTTONODO/SHEET | 1.3 (SHEET 3) | 2.3 (SHEET 1) | | |
| SOTTONODO/SHEET | | 2.4 (SHEET 2) | | |

Tabella 1. Come esempio di P&Id si sono presi quelli dei nodi 1.1, 1.2 e 1.3 delle pagine seguenti.

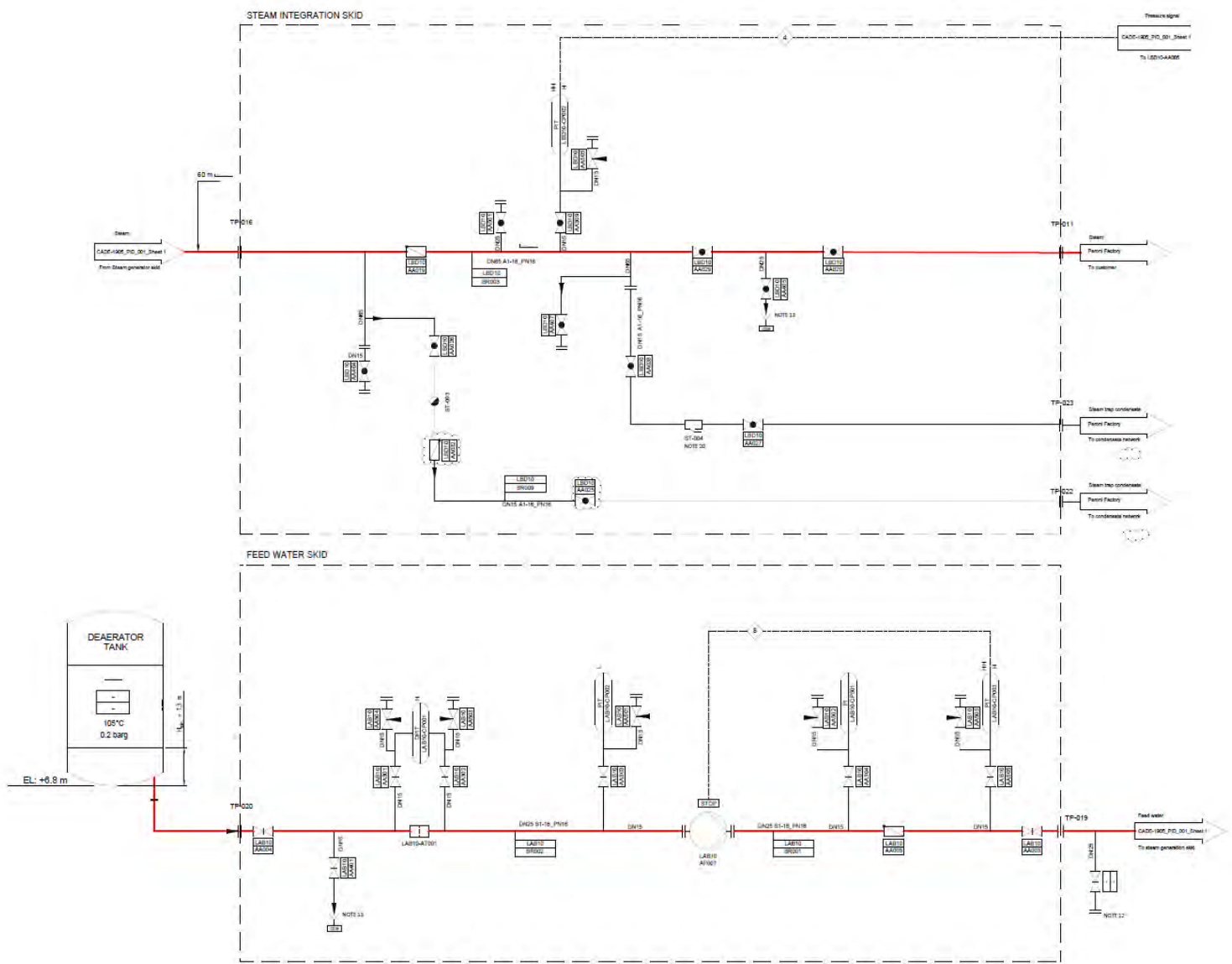
| NODES DESCRIPTION | | | | | | |
|-------------------|---|---|---|---|---|--|
| NODE | Node Intencion | Node limits | Design Conditions | Operation Conditions | P&IDs | Comments |
| 1 | Steam generation using the WAC10-AP001 working at normal and minimum flow. | This Node Analysis includes MAIN SKID, STEAM GENERATION / INTEGRATON SKID, FEED WATER SKID and outlet WAH10-AA080 to HE-3 in TEST SKID is included in this node. The node operation is according to operating modes 3A.1 and 3A.2. | Expansion Tank: WAC10-BB004 180°C / 10.5 barg. Steam Generator: HE-3 180°C / 15 barg /FV Steam Separator: LBD10-BR001 180°C / 15 barg/FV Pumps: WAC10-AP001-MAIN SKID: Design Flow: 71 m3/h Design Differential Head: 49,65 m NPSHa=91.5 m NPSHr=2,42m LAB10-AP001 FEED WATER: Design Flow: 0,9 m3/h Design Differential Head: 69,84 NPSHa=21,1 m NPSHr=2.2 m | Expansion Tank: WAC10-BB004 163.8°C / 8 barg Steam Generator: HE-3: Hot side 169.8 °C - 163.8 °C / 9 barg Cold side 133.5 °C - 162 °C / 6.5 barg Steam Separator: LBD10-BR001 162°C / 5.5 barg/FV Pumps: WAC10-AP001-MAIN SKID: Operating Flow: 71 m3/h Operating differential Head: 39,6 m NPSHa (operating cond.): 64,1 m LAB10-AP001 FEED WATER: Operating Flow: 0,75 m3/h Operating Differential Head: 55,64 m NPSHa (operating Cond): 21,1 | CADE-1905_PID_001_Seet1 CADE-1905_PID_001_Seet2 CADE-1905_PID_001_Seet3 | Pump WAC10-AP001: Discharge design Pressure: 15 barg Shut Off Pressure: 14,2 barg Pump LAB10-AP001: Discharge Design Pressure: 10 barg Shut Off Pressure: 10 barg |
| 2 | Hot Water generation working with the WAC10-AP001 and WSC10-AP001. | This Node Analysis includes MAIN SKID and TEST SKID is included in this node. The node operation is according to operating modes 3B1, 3B2 and 3B3. | Thermocline Tanks: 185°C / 8 barg. Heat Exchanger: HE-1 180°C / 15 barg. Steam Separator: LBD10-BR001 180°C / 15 barg. Expansion Tank: WAC10-BB004 180°C / 10.5 barg Pasteurizer HEX: 80°C/10 barg Pumps: WSC10-AP001- TEST A: Design Flow: 6,8 m3/h Design Differential Head: 24,88 m NPSHa=82,8 m NPSHr=0,95m WAC10-AP001-MAIN SKID: Design Flow: 71 m3/h Design Differential Head: 49,65 m NPSHa=91.5 m NPSHr=2.42m | Thermocline Tanks: 68-140°C / 6-7 barg. Heat Exchanger: HE-1 Hot side 150 °C - 142 °C / 15 barg Cold side 68 °C - 140 °C / 13.5 barg. Steam Separator: LBD10-BR001 162°C / 5.5 barg. Expansion Tank: WAC10-BB004 163.8°C / 8 barg Pasteurizer HEX: ND Pumps: WSC10-AP001- TEST A: Operating Flow: 5,7 m3/h Operating Differential Head:15 m NPSHa (Operating Cond.):83,9 m WAC10-AP001-MAIN SKID: Operating Flow: 71 m3/h Operating differential Head: 39,6 m NPSHa (operating cond.): 64,1 m | CADE-1905_PID_001_Seet1 CADE-1905_PID_001_Seet2 | Pump WSC10-AP001: Discharge Design Pressure: 13,5 barg Shut off Pressure: 11.5 barg |
| 3 | Hot water from Thermocline Tank to pasteurizer HEX | This Node Analysis includes STORAGE SKID and Thermocline tank is included in this node. The node operation is according to operating mode 4. Pending: Pasteurizer in Peroni Side | Thermocline Tanks: 185°C / 8 barg. Pasteurizer HEX: 80°C/10 barg Pumps: WSC20-AP001 TEST B: Design Flow:30 m3/h Design Differential Head: 18,34 m NPSHa=85,6 m NPSHr=1,63 m | Thermocline Tanks: 68-140°C / 6-7 barg. Pumps: WSC20-AP001 TEST B: Operating Flow: 25 m3/h Operating Differential Head: 10 m NPSHa (Operating Cond.): 86,8m | CADE-1905_PID_001_Seet2 | Pump WSC20-AP001: Discharge Design Pressure: 10 barg Shut off Pressure: 10 barg |
| 4 | Thermocline Tank in hot water loading mode, sending at the same time hot water to Pasteurizer HEX | This Node Analysis includes MAIN SKID, TES A, STORAGE SKID and Thermocline Tank is included in this node. The node operation is according to operating modes 4, 3B1, 3B2 and 3B3. | Thermocline Tanks: 185°C / 8 barg. Heat Exchanger: HE-1 180°C / 15 barg. Steam Separator: LBD10-BR001 180°C / 15 barg. Expansion Tank: WAC10-BB004 180°C / 10.5 barg Pumps: WSC20-AP001 TEST B: Design Flow:30 m3/h Design Differential Head: 18,34 m NPSHa=85,6 m NPSHr=1,63 m WSC10-AP001- TEST A: Design Flow: 6,8 m3/h Design Differential Head: 24,88 m NPSHa=82,8 m NPSHr=0,95m | Thermocline Tanks: 68-140°C / 6-7 barg. Heat Exchanger: HE-1 Hot side 150 °C - 142 °C / 15 barg Cold side 68 °C - 140 °C / 13.5 barg. Steam Separator: LBD10-BR001 180°C / 15 barg. Expansion Tank: WAC10-BB004 180°C / 10.5 barg Pumps: WSC20-AP001 TEST B: Operating Flow: 25 m3/h Operating Differential Head: 10 m NPSHa (Operating Cond.): 86,8m WSC10-AP001- TEST A: Operating Flow: 5,7 m3/h Operating Differential Head:15 m NPSHa (Operating Cond.):83,9 m | CADE-1905_PID_001_Seet1 CADE-1905_PID_001_Seet2 | The HAPOZ for this node is the combination of node 2 and 3 |

Tabella 2



Nodo 1.1

Nodo 1.2



Particolare importanza assume il punto 6 con i seguenti fattori di pericolo:

- Flusso;
- Pressione;
- Temperatura;
- Fase/processo;
- Livelli;
- Composizione;
- Servizi.

Nelle tabelle seguenti si prendono in considerazione un esempio di analisi dei nodi I, II e III, per il fattore di pericolo della temperatura.

| MAIN SKID | | | | | | |
|------------------------|----------------------------------|---|----------|--------------|------------|-----------------|
| PARAMETER: TEMPERATURE | | | | | | |
| Guideword | Deviation | Causes | Scenario | Consequences | Safeguards | Recommendations |
| Less | 1. Less Temperature in Main Skid | 1.1 See Less Temperature Main Skid In Node 2 | | | | |
| More | 2. More Temperature in Main Skid | 2.1. See More Temperature Main Skid In Node 2 | | | | |

Tabella 3. Nodo I

| FEED WATER SKID | | | | | | |
|------------------------|---|---|--|----------------------------|---|---|
| PARAMETER: TEMPERATURE | | | | | | |
| Guideword | Deviation | Causes | Scenario | Consequences | Safeguards | Recommendations |
| Less | 1 Less temperature in Feed water skid. | 1.1 Operational fluctuations in Deaerator tank. | 1.1.1 Temperature in HE-3 Cold side inlet lower than required for normal operation. Risk of decreasing in Steam Production | 1.1.1.1. Operational Risk | 1.1.1.1.1 Control Loop 5 to maintain the steam flowrate | 1.1.1.1.1.1. Confirm with users of occurrence |
| More | 2. More Temperature in Feed water skid. | 2.1. Operational fluctuations in Deaerator tank. No safety concerns for people, environment, and installations. | 2.1.1. Temperature in HE-3 Cold side inlet Higher than required for normal operation. Risk of increasing in steam production | 2.1.1.1.. Operational Risk | 2.1.1.1.1 Control Loop 5 to maintain the steam flowrate | 1.1.1.1.1.1. Confirm with users of occurrence |

Tabella 4. Nodo II

| STEAM GENERATION SKID | | | | | | |
|------------------------|--|---|--|--|---|-----------------|
| PARAMETER: TEMPERATURE | | | | | | |
| Guideword | Deviation | Causes | Scenario | Consequences | Safeguards | Recommendations |
| Less | 1. Less Temperature in HE-3 (Solar Field Side) | 1.1 See Less Flow Main Skid in this Node | | | | |
| | | 1.2 See Less Temperature Main Skid in this node | | | | |
| | 2. Less Temperature in LBD10 BB001 | 2.1 See More Flow in Steam Generation Skid in this Node | | | | |
| More | 3 Less Temperature in Steam line to end consumers | 3.1. Meteorological issues. | 3.1.1 Temperature decreases producing steam condensing across pipe length. Risk of water hammer. | 3.1.1.1.Risk of damage to people, environment, and installations | 3.1.1.1.1. LBD10-ST001/ST002/ST003 and ST004 (steam trap) 3.1.1.1.2 Insulation in the system | |
| | 4. More Temperature in Main Skid | 4.1. See More Temperature Main Skid In Node 2 | | | | |
| | 5 More Temperature in LBD10 BB001 | 5.1 See Less Flow in Steam Generation Skid in this node | | | | |
| | 6. More Temperature in Steam Line to end consumers | 6.1. No causes have been identified in this node. | | | | |

Tabella 5-Nodo III

Come si potrà osservare le tabelle e i nodi sono interconnessi fra loro al fine di raggiungere la corretta valutazione e le azioni da intraprendere per ridurre il rischio.

5. Conclusioni

Come si potrà evincere da quanto sopra un impianto di acqua surriscaldata alimentato da energia termica solare è probabilmente più complesso dei normali impianti di acqua surriscaldata alimentati da combustibili fossili, ma un'attenta analisi dei rischi potrebbe comunque coprire tale complessità, oltre anche ad alcune criticità normative.

Una prima criticità è senz'altro costituita dal fatto che gli strumenti e i componenti del "campo solare" si trovano necessariamente all'esterno e su superfici molto ampie, sottoposte alle intemperie; sarà quindi giusto pensare all'aggressione meteorologica come fattore di pericolo e procedurizzare le attività di ispezione a valle di ogni evento meteorologico avverso, oltre alle normale attività di ispezione ordinarie. In tal senso la normativa non implica nessun particolare obbligo e tutto è lasciato all'analisi dei rischi sia del fabbricante e sia dell'utilizzatore.

Una seconda criticità potrebbe essere l'applicazione pedissequa del d.m. 01.12.1975, Titolo I°, capo I, ed in particolare il punto g) in cui si richiede " *Almeno un dispositivo di intercettazione automatica dell'afflusso del combustibile che intervenga nei seguenti casi: 1) arresto della circolazione del liquido negli impianti a circolazione forzata; 2) raggiungimento della temperatura massima del liquido all'uscita del generatore stabilita in relazione alle caratteristiche dell'impianto; 3) abbassamento del livello nel vaso di espansione al di sotto del valore minimo*".

Per attendere alle prescrizioni della suddetta lettera g), i pannelli solari termici dovranno necessariamente ruotare per eliminare l'irraggiamento, ogni qualvolta si presenteranno i tre casi previsti. L'operazione di chiusura dei pannelli, per quanto potrà essere automatica e motorizzata, potrebbe comportare non poche difficoltà se eseguite con una certa frequenza, pertanto si dovrebbero studiare soluzioni alternative con effetto equipollente a quello della immediata rotazione dei pannelli solari termici. In tale contesto sembrerebbe più semplice gestire tali obblighi normativi utilizzando le valvole a tre vie situate sulla mandata e ritorno dell'impianto principale di acqua surriscaldata (Main Skid-Nodo I). Infatti, prima di passare alla rotazione dei pannelli, sarebbe opportuno utilizzare tali valvole per collegarle a sistemi di circolazione di emergenza, o aprire gli scarichi delle acque surriscaldate per un momentaneo raffreddamento, o nel caso di abbassamento dei livelli dell'acqua nel vaso di espansione, accedere ad un rimpinguamento dell'acqua istantaneo.

Lo stesso discorso si potrà fare in merito agli obblighi di disporre su tali generatori di pressostati di blocco, interruttori termici automatici di blocco e livellostati di blocco sui vasi di espansione. E' quindi chiaro come l'aggiornamento normativo si renderà necessario anche se al momento ci potrebbe essere l'alternativa costituita

dall'applicazione della Direttiva 2014/68/UE per ammettere l'esercizio di tali impianti senza l'obbligo di rispettare il d.m. 01.12.1975.

6. Bibliografia

- [1] M.A. Cucumo, U. Marinelli, G. Oliveti: Ingegneria solare – Principi ed applicazioni – Pitagora editrice 1994;
- [2] B.J.Huang, C.P.Lee. Long-term performance of solar-assisted heat pump water heater, Renewable Energy, vol. 29: 633-639, 2003.

Raccolta dei dati ed analisi statistica dei rilievi emersi nell'ambito della valutazione di conformità di attrezzature e insiemi a pressione

F. Giacobbe², E.M. Carducci¹, F. Buti¹, L. Pugliese¹

¹Inail - Dit, Organismo Notificato per le direttive di prodotto

²Inail - Uot di Messina

Abstract

Gli Organismi notificati (ON) per le direttive europee di prodotto per operare devono stabilire e mantenere attivo un sistema di gestione qualità (SGQ) in grado di garantire il soddisfacimento dei requisiti previsti dalle norme. Uno dei principi cardine di ogni SGQ è l'analisi dei dati e delle informazioni correlati ai diversi processi. Significativi elementi di valutazione richiesti si riscontrano sulla conformità dei prodotti. I dati vengono raccolti come registrazioni durante le ispezioni, le prove condotte sul prodotto, le verifiche di sorveglianza.

Nel presente lavoro verranno presentati ed analizzati tali dati raccolti durante l'attività di certificazione di attrezzature a pressione di INAIL ON 0100, in conformità alla direttiva 2014/68/UE (PED), nel periodo 2018-2023. In particolare, sarà presentata una statistica delle principali criticità e punti di forza dei SGQ applicati dai fabbricanti, evidenziandone l'evoluzione subita alla luce degli adeguamenti normative e del progresso tecnico.

Considerata la complessità dell'ambito di certificazione PED e le indicazioni specifiche previste dalla stessa per l'implementazione del SGQ nei casi di adozione di moduli qualità, l'analisi svolta fornirà indicazioni sui principi per un approccio sistemico finalizzato alla valutazione della conformità da parte del fabbricante.

Il lavoro dimostrerà come la valutazione dei dati e delle informazioni emergenti dal monitoraggio e dalla misurazione dei processi di certificazione rappresenti non solo un efficace strumento di governance dell'ON, ma anche la base imprescindibile del miglioramento continuo dei processi stessi, e con essi, della sicurezza delle attrezzature ed insiemi immessi sul mercato.

Keywords: analisi dati, conformità, approccio sistemico alla fabbricazione, miglioramento continuo.

1. Introduzione

Per dimostrare la conformità ai requisiti essenziali di sicurezza (RES) il fabbricante deve ottemperare alle procedure previste dalle diverse direttive europee di prodotto applicabili ed apporre a conclusione delle attività la marcatura CE. Essa è

lo strumento per comunicare agli utilizzatori che quel prodotto rispetta i RES cogenti contenuti nella direttiva di riferimento. Secondo la sua natura, un prodotto può essere soggetto a requisiti di più direttive. Si consideri ad esempio un impianto di automazione industriale; questo può essere soggetto alla direttiva PED, direttiva macchine, compatibilità elettromagnetica e materiale elettrico di bassa tensione. Ai fini dell'ottenimento di uno schema che sia chiaro ed uniforme in tutti gli stati membri, la Commissione Europea ha introdotto una serie di percorsi per la certificazione della conformità ai requisiti delle direttive tecniche. Tali percorsi sono noti come moduli. Il Fabbricante deve predisporre ed archiviare tutta la documentazione che permette di evidenziare la conformità alle direttive di prodotto. Tale raccolta rappresenta il cosiddetto fascicolo tecnico che contiene:

- la descrizione tecnica del prodotto e del processo di produzione;
- gli elementi di uscita del processo di progettazione e sviluppo;
- un'accurata analisi dei rischi per l'utilizzatore; le azioni intraprese a livello progettuale e del processo produttivo per contenere od eliminare i rischi.

2. I moduli di base per la valutazione della conformità

La valutazione della conformità si articola in moduli, applicabili alla fase della progettazione, della fabbricazione o ad entrambe. La normativa comunitaria prevede 8 diversi moduli di base, contrassegnati dalle lettere dell'alfabeto A-B-C-D-E-F-G-H, descritti in apposite Decisioni del Consiglio, ma è importante precisare che si tratta di modelli astratti che possono quindi differire leggermente dalle procedure previste dalle singole direttive. Di conseguenza, il fabbricante dovrà sempre fare riferimento al testo della direttiva che regola il prodotto in questione, in modo da identificare le procedure effettivamente applicabili al suo prodotto e scegliere quella più adeguata.

Ogni direttiva del tipo "Nuovo Approccio" indica specificamente quali fra i vari moduli debbono essere utilizzati dal fabbricante per la valutazione della conformità. In genere, le direttive europee indicano più di un modulo, lasciando per quanto possibile al fabbricante una certa libertà di scelta. Tra le varie possibilità vi è anche la condizione correlata all'implementazione di un sistema qualità.

Per l'applicazione dei moduli D, D1, E, E1, H, H1 il fabbricante deve implementare un sistema di gestione per la qualità idoneo ad assicurare la produzione di attrezzature a pressione identiche ai tipi approvati e/o ai requisiti stabiliti dalla normativa di riferimento.

In funzione della categoria dell'attrezzatura / insieme il fabbricante decide il modulo da applicare secondo le possibilità di seguito indicate (tabella 1)

| categoria | Moduli | | | | |
|-----------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------|---|
| I | A | | | | |
| II | A2 | D1 | E1 | | |
| III | B (design type) + D | B (design type) + F | B (production type) + E | B (production type) + C2 | H |
| IV | B (production type) + D | B (production type) + F | G | H1 | |

Tabella 1. I moduli utilizzabili per la direttiva PED

In funzione della fabbricazione con o senza SQ oppure se trattasi di prodotto singolo o di serie di seguito si riportano le possibili scelte dei moduli applicabili (figura 1)

| FABBRICAZIONE CON SQ | | FABBRICAZIONE SENZA SQ | |
|--------------------------------|---------|--------------------------|---------|
| D1 | II cat | A2 | II cat |
| E1 | II cat | B (production type) + C2 | III |
| B (design type) + D | III cat | cat | |
| B (production type) + E | III | B (design type) + F | III cat |
| cat | | B (production type) + F | IV |
| H | III cat | cat | |
| B (production type) + D | IV | G | IV cat |
| cat | | | |
| H1 | IV cat | | |
| PRODOTTO SINGOLO | | PRODUZIONE DI SERIE | |
| A2 | II cat | A2 | II cat |
| G | IV cat | E1 | II cat |
| | | B (design type) + D | III cat |
| <i>Ulteriori potenzialità:</i> | | B (production type) + C2 | III |
| B (production type) + C2 | III | cat | |
| cat | | B (design type) + F | III cat |
| B (design type) + F | III cat | H | III cat |
| B (production type) + F | IV | B (production type) + F | IV |
| cat | | cat | |
| | | H1 | IV cat |

Figura 1. Moduli applicabili ai sensi della direttiva PED

3. Considerazioni sull'esito degli audit

Per l'emissione ed il mantenimento della certificazione del sistema qualità, nel caso di adozione da parte del fabbricante dei moduli qualità, vengono eseguite da parte dell'organismo notificato verifiche ispettive di certificazione, sorveglianza e rinnovo. In particolare, in fase di emissione si procede con la fase stage 1 (esame documentale del SQ) e successivamente con lo stage 2 (audit sul SQ presso il

fabbricante). Al fine di definire un peso ai singoli rilievi emersi sono state definite tre tipologie aventi criticità decrescente.

- Non Conformità: rilievo/non conformità, di importanza maggiore, che segnala la presenza di una deviazione/mancanza nel processo di valutazione della conformità.
- Osservazione: rilievo/non conformità, di importanza minore, il cui risultato non inficia la valutazione finale della conformità del prodotto.
- Raccomandazione: nota che si configura come spunto di miglioramento oppure la stessa attualmente non compromette la conformità, ma potrebbe comprometterla in futuro.

Di seguito si riportano le considerazioni conseguenti ai rilievi emersi nel corso delle verifiche ispettive presso fabbricanti che adottano i moduli qualità (es. modulo D, modulo H1, etc).

Al fine di analizzare gli esiti i dati sono stati suddivisi in tre macro condizioni, ovvero in carenze nella formulazione documentale del sistema qualità, in carenze nell'attuazione delle procedure del sistema qualità ed in carenze riscontrate nel fascicolo tecnico. Per ogni singola condizione sono state previste altresì ulteriori suddivisioni per una valutazione maggiormente approfondita e dettagliata.

Di seguito si riportano alcuni esempi di rilievi emersi nel corso di circa 6 anni, suddivisi per macro condizione e per livello di criticità, ed analizziamo mediante delle rappresentazioni statistiche l'incidenza tra i diversi rilievi. I riferimenti espliciti sono generalizzati con xx.

3.1. Carenze nella formulazione documentale del sistema qualità

Di seguito alcuni esempi di rilievi suddivisi per livello di gravità:

Osservazioni:

- I criteri operativi adottati per la tracciabilità dell'apparecchio non sono sufficientemente documentati a sistema (rif. Procedura xxx identificazione e rintracciabilità rev.xx del xxx).
- Nel manuale qualità in rev. xx del xx.xx.xx, impostato secondo i requisiti della ISO 9001, non risulta evidente in forma diretta ed esplicita la correlazione con i requisiti del SQ secondo il modulo H1. Si evidenzia che comunque i requisiti del SQ per direttiva PED sono documentati già nel sistema qualità implementato.
- Nella documentazione del sistema qualità non sono presenti riferimenti alla direttiva PED ed ai relativi adempimenti correlati al modulo H1. Si evidenzia altresì che la procedura xxx relativa a "progettazione e sviluppo" non è sempre coerente con i requisiti di cui al modulo H1, prendendo in esame criteri operativi assimilabili maggiormente ai moduli per singolo prodotto.
- La procedura di riferimento pur descrivendo i controlli da effettuare non riporta le estensioni dei CND (rif. xxx rev. xx del xxx, prove, controlli e collaudi). Tali riferimenti sono riportati nei disegni costruttivi.

- La registrazione delle tarature interne delle saldatrici non evidenzia le singole misurazioni effettuate ed i relativi eventuali scostamenti riscontrati. Non sono state definite le tolleranze ritenute accettabili. Valutare le modalità operative della conduzione della taratura interna dei “manometri operativi”, tenendo in considerazione il grado di accuratezza degli stessi, al fine di quantificare l’errore ammesso a sistema.

Raccomandazioni:

- Il documento “mappatura dei processi aziendali” del xx.xx.xx rev.xx non analizza e rappresenta, in modo esaustivo, le singole fasi che costituiscono il processo produzione per gli aspetti riguardanti il modulo H1. Si raccomanda di approfondire il flow chart evidenziando la successione delle singole fasi e le interconnessioni con gli aspetti diretti e trasversali previsti dal sistema qualità (quali ad esempio i controlli in process e finali, le competenze e qualifiche degli operatori, i controlli in accettazione, gestione NC, manutenzione macchinari, ecc.).
- Si raccomanda di riesaminare la procedura di riferimento sulla identificazione e rintracciabilità dei materiali e semilavorati secondo quanto indicato e richiesto dalla direttiva PED ed in particolare per le lamiere ed i consumabili.
- Tenuto conto della volontà della Direzione di adottare il SQ finalizzato alla produzione di attrezzature a pressione secondo quanto previsto dal modulo H1 della direttiva PED si evidenzia che tale impegno non è chiaramente evidenziato nella politica della qualità (rif. Politica qualità del xxx).
- Si raccomanda di aggiornare la documentazione di sistema in funzione della nuova direttiva PED (2014/68/UE).
- Nel riesame della direzione non si ha esplicita evidenza dell’analisi dell’efficienza del SQ così come previsto dal par. 3.2 del modulo H1 (rif. Riesame della Direzione del xxx).

Nel periodo in esame l’analisi dei dati evidenzia l’assenza di non conformità. A livello di osservazioni si evince una predominanza delle carenze sulla struttura della documentazione. Da evidenziare che le procedure su prove, esami, controlli e verifiche necessitano di aggiornamento e personalizzazione (tabella 2, figura 2).

| CARENZE NELLA FORMULAZIONE DOCUMENTALE DEL SISTEMA QUALITA' | non conformità | osservazioni | raccomandazioni | totale rilievi | percentuale |
|--|----------------|--------------|-----------------|----------------|-------------|
| 1 <i>struttura della documentazione</i> | | 12 | 14 | 26 | 22,2 % |
| 2 <i>struttura organizzativa</i> | | 3 | 3 | 6 | 5,1 % |
| 3 <i>gestione delle risorse</i> | | 2 | 6 | 8 | 6,8 % |
| 4 <i>responsabilità di gestione della progettazione</i> | | 5 | 2 | 7 | 6,0 % |
| 5 <i>responsabilità di gestione della produzione</i> | | 2 | 3 | 5 | 4,3 % |
| 6 <i>responsabilità di gestione delle prove e controlli</i> | | 2 | 4 | 6 | 5,1 % |
| 7 <i>specifiche tecniche sulla progettazione</i> | | 8 | 7 | 15 | 12,8 % |
| 8 <i>struttura del fascicolo tecnico</i> | | 3 | 4 | 7 | 6,0 % |
| 9 <i>specifiche delle tecniche sui materiali impiegati</i> | | 2 | 6 | 8 | 6,8 % |
| 10 <i>specifiche delle tecniche sulle giunzioni permanenti</i> | | 4 | 8 | 12 | 10,3 % |
| 11 <i>procedure su prove, esami, controlli e verifiche</i> | | 5 | 12 | 17 | 14,5 % |
| | 0 | 48 | 69 | 117 | 100 % |
| | 0,0 % | 41,0 % | 59,0 % | | |

Tabella 2. Suddivisione del campione delle carenze nella formulazione documentale del Sistema Qualità

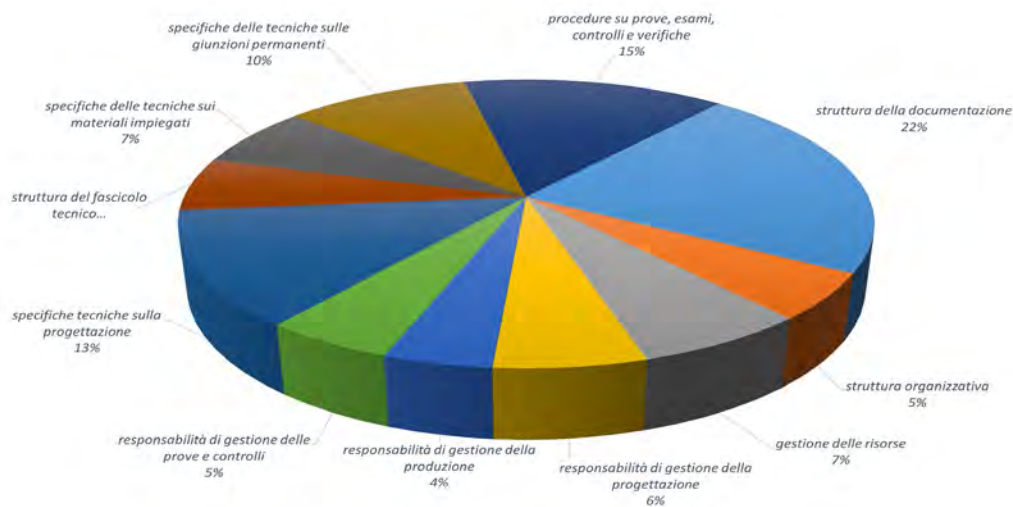


Figura 2. Rappresentazione statistica delle carenze nella formulazione documentale del Sistema Qualità

3.2. Carenze nell'attuazione delle procedure del sistema qualità

Di seguito alcuni esempi di rilievi suddivisi per livello di gravità:

Non conformità

- I controlli superficiali secondo metodo PT effettuati dall'operatore xxx, relativamente alla commessa xx, non sono coperti da certificato CND in corso di validità (certificato xxx).
- Il processo di sabbiatura, propedeutico alla verniciatura superficiale finale, viene eseguito con macchinario in evidente stato di inefficienza (rif. componenti smontati, getto condizionato dalla corrosione della pistola). Tale condizione non garantisce continuità operativa e i livelli qualitativi richiesti nella procedura di riferimento (PRO xx rev. xx del xx).
- Le giunzioni saldate delle lamiere in alluminio effettuate dagli operatori addetti non sono coperte da certificato di qualifica in corso di validità (es. certificato xxx). Si evidenzia altresì che non sono registrate le evidenze semestrali da parte del datore di lavoro in riferimento alla continuità operativa.

Osservazioni

- In riferimento alla produzione del prodotto xxx NF xxx non si hanno evidenze dell'esecuzione dei controlli CND ad esclusione dell'esame visivo.
- Il report dell'esame ultrasonoro difettoscopico non sempre riporta il riferimento al numero di fabbrica dell'apparecchio (serie xx, rif. NF. xxx).
- La prova finale, sul lato mantello dello scambiatore NF xx, è stata effettuata ad una pressione difforme (superiore di 2,5 bar rispetto ai 32 bar previsti) rispetto alla procedura interna di riferimento (PRO xx rev. xx del xx). Si evidenzia che gli scambiatori NF xx e xx, la cui prova finale è avvenuta nel medesimo giorno il valore di PS è corretto. Valutare a sistema una procedura operativa per la

gestione delle prove finali nei casi di prodotti di famiglie diverse testati nella medesima giornata.

- La procedura interna di verifica periodica sulle saldatrici (istruzione operativa xxx rev. xx del xx) prevede il controllo annuale dei parametri elettrici corrente e tensione. Non risulta effettuato il controllo relativamente agli ultimi 12 mesi (rif. elettrosaldatrice xx, s/n xx).
- La gestione delle verifiche ispettive interne (procedura xxx rev. xx del xx) presenta alcune carenze che ne condizionano l'efficacia. In particolare, il piano annuale non evidenzia la valutazione dei singoli requisiti di cui al modulo H1; non risulta valutato e registrato l'esito del possesso dei requisiti definiti a sistema per gli auditor esterni; la conduzione della verifica non è supportata da dedicate check list; non sono indicate le evidenze oggettive verificate (audit interno del xx).
- La zona stoccaggio prodotti non conformi non risulta debitamente delimitata come da istruzioni definite nella procedura xxx rev. xx del xx.

Raccomandazioni

- Si raccomanda di verificare periodicamente il possesso dei requisiti definiti a sistema (rif. manuale qualità capitolo gestione delle risorse umane rev. xx del xx) per le funzioni aventi mansioni significative nell'ambito PED (es. controllo qualità, progettista, responsabile qualità, addetti CND, saldatori, ecc).
- Si raccomanda di richiedere formalmente in ogni singolo ordine di lamiera che i materiali siano accompagnati da certificato EN 10204 3.1 (rif. ordine a xx del xx).
- I documenti della: politica della qualità xxx, riesame della direzione del xxx, raccolta dati mensili per il monitoraggio indicatori di prestazione ed obiettivi del xxx non evidenziano considerazioni di obiettivi di qualità ai sensi del par.3.2 del modulo H1 (all. III della direttiva 2014/68/UE).
- Si rileva che il fondo scala dei manometri indicati nella procedura di sistema non soddisfa quanto indicato nel punto 10.2.3.11 pressure gauges della norma UNI EN 13445:2014 parte 5 (f.s. 2xPi e comunque tra 1,5 e 4 volte la p.i.); il fondo scala previsto in procedura è 1,2 volte la pressione di prova. Si raccomanda di utilizzare manometri con idoneo fondo scala per l'effettuazione della prova idraulica finale (rif. manometro s/n xx).
- Si rileva che non tutti i disegni di cui ai fascicoli tecnici mantengono la tracciabilità tra la tavola del recipiente ed il relativo fascicolo tecnico della famiglia. Si raccomanda di migliorare la tracciabilità dei disegni (rif. disegno n. xxx e fascicolo tecnico famiglia xxx).
- Si raccomanda di isolare i semilavorati giudicati non conformi nell'apposita area come indicato nella procedura di riferimento (rif. istruzione "gestione dei prodotti non conformi" rev.xx del xx). Si evidenzia che i semilavorati presentano l'apposito cartellino rosso previsto in procedura.

Nel periodo in esame l'analisi dei dati evidenzia l'emissione di n.4 non conformità e precisamente per "idoneità dei locali e delle attrezzature impiegate", "gestione

- Le valutazioni sulla fatica non sono documentate con gli appositi calcoli previsti dalla normativa indicata nel fascicolo tecnico. Sono presenti solo considerazioni generiche e sommarie nell'analisi dei pericoli (rif. doc. xx pag. xx).
- Non risultano emesse le WPS dei nuovi procedimenti di saldatura utilizzati (saldature di sovrapposizione delle lamiere posteriori in corrispondenza del cono – vedi disegno xxx particolare giunto Q).
- Il fascicolo tecnico non documenta in modo sufficiente le valutazioni strutturali per quanto riguarda le aperture presenti sulle membrature. Per le attrezzature aventi $\square 1200$ sono presenti tabelle riepilogative dei calcoli degli spessori minimi ma non sono formalizzate le considerazioni by formula. (rif. tavole xxx).

Osservazioni

- La marcatura CE non è perfettamente conforme al logo previsto dalla direttiva PED. Inoltre, sulla targa viene indicato come contenuto solo l'aria e non anche il materiale solido.
- Il piano di fabbricazione controllo (rif. PFQ xx) per il prodotto xxx non documenta correttamente tutti i CND da eseguire. Valutare l'estensione dei controlli distruttivi sui talloni di saldatura secondo quanto prescritto dalla normativa tecnica utilizzata (es. Raccolta S).
- Evidenziare nel fascicolo tecnico che il calcolo di stabilità effettuato sul modello xxx è significativo per la famiglia xx. Tale indicazione è riportata in forma non puntuale nella descrizione generale dell'attrezzatura (rif. fascicolo tecnico pag. xx).
- Nell'apparecchio NF xxx la temperatura riportata nella dichiarazione di conformità è diversa da quella presente nel fascicolo tecnico (temperatura minima -30° anziché -10°). Si evidenzia che la part list dei componenti facenti parte dell'insieme è parziale in quanto non è indicato l'economizzatore.

Raccomandazioni

- L'analisi dei rischi è stata effettuata in correlazione ai RES previsti dall'allegato I della Direttiva PED. Si richiede di ampliare le valutazioni relativamente all'eventuale influenza delle vibrazioni.
- Migliorare l'esplicitazione delle considerazioni tecniche sui materiali impiegati. In particolare, ad esempio, inserire nei disegni ed in un paragrafo del fascicolo tecnico l'elenco dei materiali con il riferimento al gruppo ex EN 15608. Ciò dovrà valere sia per i materiali EN e sia per i materiali ASTM. Tutte le informazioni dovranno riflettere quanto richiesto dal paragrafo 8.5 della norma EN 14726-1: 2020.
- L'analisi dei rischi è strutturata tenendo conto dei pericoli connessi all'impiego delle attrezzature. Si raccomanda di migliorare le considerazioni di carattere tecnico in riferimento alle attrezzature già marcate secondo la direttiva PED. Migliorare inoltre le considerazioni tecniche che indicano e giustificano la marcatura CE secondo insieme.
- Da un riscontro in produzione della dimensione dei diametri interni dopo la mandrinatura si rilevano per soli n. 2 tubi su un'intera piastra tubiera un lieve scostamento di misura (range previsto tra $7.30\text{mm} \div 7.35\text{mm}$ e rilevato 7.38mm e

7.39mm utilizzando il micrometro xx scala 6-8 mm) rispetto a quanto previsto a progetto. Valutare se necessario apportare modifiche a livello di specifiche tecniche o di sistema di gestione (es. le tolleranze dimensionali, manutenzione utensili/macchinario, strumentazione di misura utilizzata, ecc). (macchina xx).

- Specificare meglio le modalità di esecuzione dei controlli visivi delle parti non direttamente/facilmente accessibili durante la fabbricazione (es. controllo della piena penetrazione delle saldature tra piastra e fasciame, controllo della piena penetrazione dei giunti fra fasciame e tronchetti, ecc).
- In riferimento al RES par. 2.10 (protezione contro il superamento dei limiti ammissibili dell'attrezzatura a pressione) si rileva che il fabbricante, nel Manuale d'uso e manutenzione, segnala che le valvole di sicurezza devono essere adeguatamente dimensionate ma non fornisce una sufficiente informazione circa i limiti associati alle connessioni previste al montaggio del dispositivo di protezione stesso.
- Il disegno xxx riporta i riferimenti non aggiornati ai materiali utilizzati ovvero lamiere in alluminio P-Al- Mg 4.5 R UNI 7790/77 anziché EN 14286.
- Si rileva che l'estensione dei controlli, derivata dalla edizione della EN13445:2002 parte 5 non è aggiornata, comunque la stessa è altresì coerente con la Raccolta S ed. 99. Valutare l'implementazione dell'estensione dei controlli secondo l'ultima revisione della norma EN13445 parte 5.

Nel periodo in esame l'analisi dei dati evidenzia l'emissione di alcune non conformità e precisamente per l'applicazione delle formule di calcolo per le verifiche di stabilità, per carenza del fascicolo tecnico rispetto alle norme utilizzate e per la definizione ed estensione dei CND. A livello di osservazioni / raccomandazioni si evince una predominanza delle carenze relative agli aspetti correlati alla progettazione (es. calcoli, disegni, norme utilizzate) (tabella 4, figura 4).

| CARENZE TECNICHE RISCONTRATE NEL FASCICOLO | non conformità | osservazioni | raccomandazioni | totale rilievi | percentuale |
|--|----------------|--------------|-----------------|----------------|-------------|
| 26 <i>Dati di targa</i> | | 1 | 3 | 4 | 2,0 % |
| 27 <i>Descrizione dell'attrezzatura/insieme</i> | | 3 | 4 | 7 | 3,6 % |
| 28 <i>Analisi dei rischi e dei pericoli</i> | | 6 | 8 | 14 | 7,1 % |
| 29 <i>Analisi dei RES</i> | | 8 | 13 | 21 | 10,7 % |
| 30 <i>materiali impiegati</i> | | 9 | 16 | 25 | 12,7 % |
| 31 <i>Disegni e/o schemi di assemblaggio</i> | | 17 | 8 | 25 | 12,7 % |
| 32 <i>Calcoli dimensionali e di stabilità</i> | 2 | 24 | 18 | 44 | 22,3 % |
| 33 <i>Coerenza del fascicolo alle norme utilizzate</i> | 2 | 10 | 8 | 20 | 10,2 % |
| 34 <i>Definizione ed estensione dei CND</i> | 1 | 15 | 6 | 22 | 11,2 % |
| 35 <i>Libretto d'uso e manutenzione</i> | | 3 | 12 | 15 | 7,6 % |
| | 5 | 96 | 96 | 197 | 100 % |
| | 2,5 % | 48,7 % | 48,7 % | | |

Tabella 4. Suddivisione del campione delle carenze riscontrate nel fascicolo tecnico

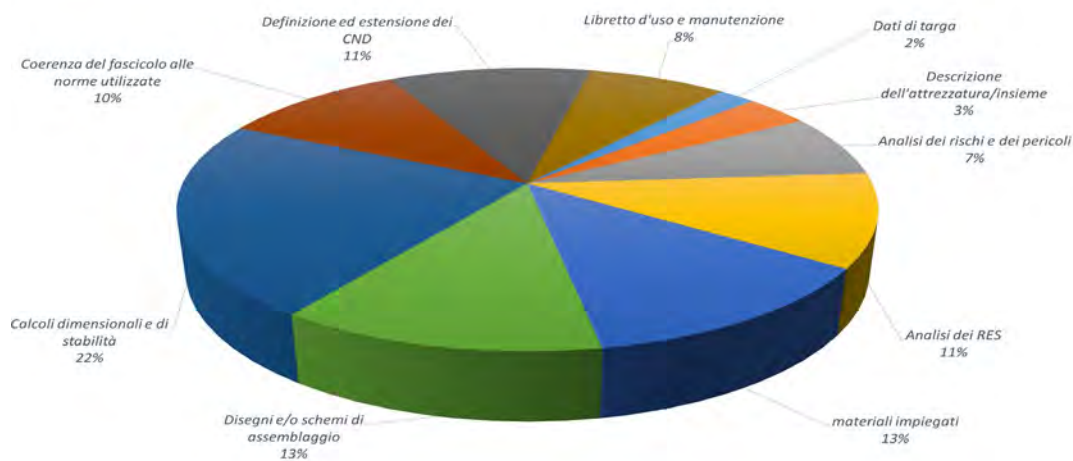


Figura 4. Rappresentazione statistica delle carenze riscontrate nel fascicolo tecnico

4. Risultati

Dall'analisi delle risultanze emerse nel corso delle verifiche ispettive presso i fabbricanti, in un arco temporale di 6 anni, è possibile estrapolare diverse considerazioni di sintesi. Nel complesso la numerosità delle non conformità, ovvero di condizioni che pregiudicano significativamente la conformità alla direttiva, è limitata (pari al 1,4% dei rilievi). Le criticità maggiori emergono relativamente alle carenze riscontrate nel fascicolo tecnico.

Si riscontra un'incidenza significativa sia relativamente al sistema che documenta i processi che alle specifiche tecniche progettuali. I fabbricanti manifestano carenze, classificate come osservazioni e raccomandazioni, che evidenziano la necessità di approfondimento dei livelli di implementazione del sistema qualità (figura 5).



Figura 5. Incidenza del livello di criticità (non conformità - osservazione - raccomandazione)

Dall'analisi dei dati si evince da parte dei Fabbricanti una difficoltà diffusa ad attuare in modo efficace il sistema qualità attraverso i suoi strumenti. In particolare, non sempre le procedure adottate sono correttamente documentate e coerenti con le attività effettivamente svolte (figura 6).

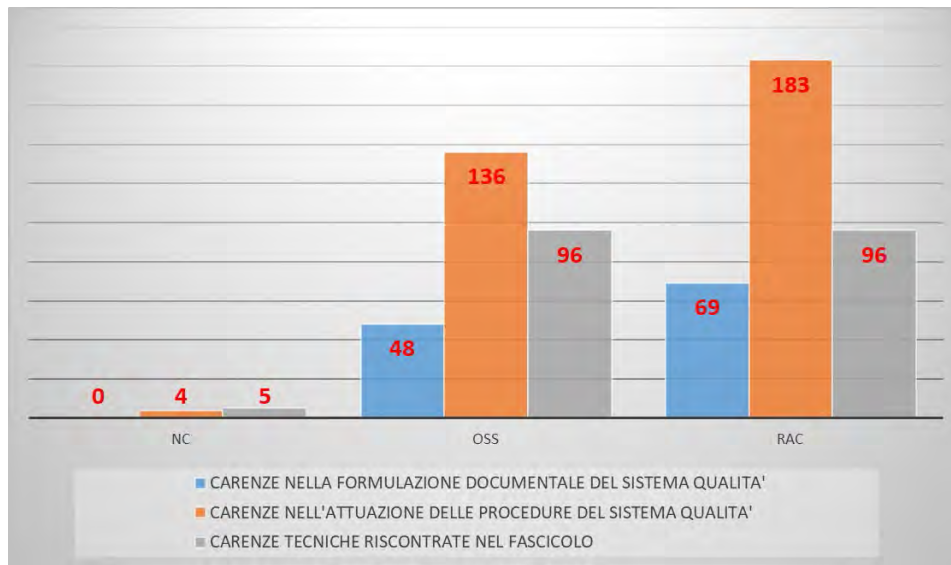


Figura 6. Numerosità dei rilievi emersi nel corso degli audit suddivisi per livello di criticità

5. Conclusioni

Con il presente lavoro è stata effettuata un'analisi sugli esiti degli audit sui moduli qualità implementati dai fabbricanti nell'ambito della certificazione PED. I risultati evidenziano la prevalenza di emissione di rilievi aventi livello pari a "raccomandazione" e "osservazione" che determinano azioni correttive di miglioramento.

Tali risultati indicano un buon livello di maturità del sistema qualità utilizzato dai fabbricanti e permettono all'Organismo Notificato di conoscere le tematiche soggette potenzialmente a criticità.

Ringraziamenti

Si ringraziano la dott.ssa Chiara Pierdominici ed il sig. Simone Mariani per il contributo fornito alla realizzazione di questo lavoro, principalmente per la raccolta dati e gli aspetti editoriali.

6. Bibliografia

- [1] Zeman J.L., The role of quality systems in the Pressure Equipment Directive, Technology, Law and Insurance, 3:3, 183-189, DOI: 10.1080/135993798349370, 1998
- [2] Giacobbe F., Bemporad E., Pera F., Conformity assessment procedures of the Directive 2014/68/UE (PED) and implementation of the Quality Management System ISO 9001: 2015", Proceedings of the 30th European Safety and Reliability Conference and the 15th Probabilistic Safety Assessment and Management Conference, 2020

[3] A. Fortuni, F. Giacobbe, L. Pugliese, F. Buti, C. Pierdominici, S. Mariani, Organismo notificato per la direttiva PED. Analisi dei dati, atti safap 2018

[4] Tommi M., Identification of Mechanical Issues Related to Pressure Equipment Directive and Harmonised Standards, Wärtsilä Energy Business, 2020

Progettazione e certificazione PED di un impianto con reattore di carbonatazione operante in regime di creep-fatica

L. Scano¹, L. Santi²

¹ S.S.I. s.r.l. – Studio Scano

² Greenbone Ortho S.p.A.

Abstract

La Direttiva 2014/68/UE PED definisce i Requisiti Essenziali di Sicurezza (RES) che un'attrezzatura a pressione deve soddisfare ai fini della certificazione CE di prodotto. Nella presente memoria viene descritto l'iter progettuale e certificativo di un reattore di carbonatazione in superlega di nickel tipo Inconel 625, operante alla pressione PS = 150 barg e alla temperatura di 700 °C in regime di creep e fatica oligociclica.

La progettazione, basata sulla norma armonizzata EN 13445-3 [1], è stata supportata dalle metodologie avanzate del codice API 579-1 [2] per la valutazione del danno da creep-fatica, in ottemperanza all'Allegato I par. 2.2.3-b della Direttiva PED [3]. Il materiale da costruzione è stato completamente caratterizzato dal punto di vista del creep e della resistenza a fatica e il danno cumulativo sul componente è stato simulato tramite analisi FEM elastoplastica nel dominio del tempo.

L'analisi del comportamento in temperatura del materiale, inoltre, ha messo in luce come le superleghe di nickel tipo Inconel 625 siano caratterizzate da meccanismi di infragilimento a caldo nel range 600 – 800 °C, causati dalla precipitazione di fasi intermetalliche e di carburi ai bordi del grano austenitico. Tale evidenza ha avuto un impatto rilevante sulla analisi dei rischi PED, portando alla progettazione integrata di un sistema meccanico di contenimento e protezione in caso di scoppio o di proiezione di frammenti causati dalla frattura fragile del reattore in temperatura. Il calcolo di tale sarcofago protettivo è stato condotto con metodiche FEM avanzate e analisi dinamiche ad elevato strain-rate, chiudendo così il cerchio del rispetto dei RES PED.

Keywords: PED, Design-by-Analysis, creep, fatigue, nickel-based-alloy

1. Nomenclatura

| | | | |
|-----------------|------------------------------------|----------------|------------------------------|
| A | Costante di Norton | S _e | Sforzo equivalente effettivo |
| A _i | Coefficienti polinomiale LMP | T | (MPa) |
| C | Costante di Larson-Miller (20) | T _H | Temperatura assoluta (K) |
| D _{cf} | Danno da creep/fatica | t | Temperatura omologa (K) |
| D _i | Coefficienti di danno di Johnson & | t _r | Tempo di integrazione (h) |
| L | Cook | TS | Tempo a rottura (h) |
| LMP | Creep life (h) | X,Y,Z | Temperatura di progetto (°C) |
| l,m | Parametro di Laron-Miller | ε | Costanti di Johnson & Cook |

| | | | |
|----|----------------------------------|------------|-----------------------------|
| n | Esponenti di Johnson & Cook | e_f | Strain-rate (1/h) |
| p | Esponente di Norton | $e_{p(n)}$ | Strain-to-failure (mm/mm) |
| PS | Pressione idrostatica (MPa) | s | Deformazione plastica |
| Q | Pressione di progetto (barg) | S_y | (normalizzata) |
| R | Energia di attivazione (kJ/mol) | | Sforzo (MPa) |
| | Costante dei gas (8.314 J/mol·K) | | Carico di snervamento (MPa) |

2. Introduzione

Nella presente memoria si descrive l'approccio tecnico-ingegneristico utilizzato per la progettazione, la certificazione in ambito PED e l'utilizzo sicuro di un impianto con reattore di carbonatazione operante in regime di funzionamento ciclico ad alta pressione e temperatura.

Il processo di carbonatazione impiegato in tale attrezzatura è parte di un ciclo più complesso per la produzione di innesti ossei sintetici a partire da matrici di origine vegetale. All'interno del reattore, la carbonatazione dei campioni avviene per esposizione ad anidride carbonica attraverso un ciclo di lavoro avente pressione e temperatura massime pari a 150.0 barg e 700 °C. Tali valori sono i dati di progetto dell'apparecchio ai fini dell'analisi strutturale e della classificazione PED (PS, TS). In tali condizioni di funzionamento risultano inoltre attivati due meccanismi di danno dipendenti dal tempo: la fatica oligociclica e lo scorrimento viscoso a caldo (creep). Entrambi questi fenomeni devono essere quindi valutati in sede di analisi dei rischi e di calcolo strutturale ai sensi dell'Allegato I par. 2.2.3-b della Direttiva PED. Essi hanno inoltre indirizzato la scelta del materiale da costruzione verso le superleghe di nickel, note per l'elevata resistenza in tale regime di funzionamento e per le superiori proprietà anti-corrosive. In particolare, per il caso in esame, è stata scelta una lega commerciale tipo Inconel 625.

Il codice di calcolo utilizzato per la progettazione del reattore è la norma armonizzata EN 13445-3. Dal punto di vista statico è stato scelto di eseguire un calcolo con modalità per analisi termo-meccanica di tipo elastico lineare e classificazione delle tensioni in accordo all'Annex C. Per quanto riguarda la valutazione a fatica e a creep, è stato invece utilizzato un approccio di dettaglio basato su analisi FEM elastoplastica nel dominio del tempo in accordo allo standard API 579-1. Questo ha permesso di stimare esattamente l'accumulo di deformazione plastica da creep in funzione dei cicli effettivi di lavoro del reattore e di valutare il danno combinato da creep e fatica, rinunciando ad ipotesi eccessivamente conservative. Ai fini di tale analisi, il materiale da costruzione è stato completamente caratterizzato in termini di comportamento ad alta temperatura e in regime di funzionamento ciclico.

Parallelamente all'analisi strutturale, l'analisi dei rischi del reattore, eseguita per verificare il rispetto dei Requisiti Essenziali di Sicurezza (RES) della Direttiva PED (Allegato I), ha evidenziato una criticità relativa al materiale da costruzione, che è caratterizzato da una finestra di potenziale infragilimento a caldo nel range 600 – 800 °C, intersecante la TS dell'apparecchio. Tale fenomeno, ben noto in letteratura

[4][5][6][7], è originato dalla precipitazione di fasi intermetalliche all'interno della matrice austenitica e di carburi ai bordi del grano durante l'esercizio prolungato in regime di creep, e risulta accelerato dal campo di sforzo applicato al componente. Non essendo possibile eliminare tale rischio associato all'esercizio, si è proceduto a definire gli interventi passivi volti alla minimizzazione dello stesso, con conseguente informazione all'Utilizzatore attraverso il manuale d'uso dell'attrezzatura. In particolar modo, è stato progettato un sarcofago di contenimento in carpenteria metallica destinato a proteggere l'operatore del reattore dall'eventuale onda d'urto e dalla proiezione di frammenti ad alta energia in caso di accidentale rottura fragile dello stesso. Al fine di ottimizzare la leggerezza e la manovrabilità di tale struttura, il design è stato eseguito tramite analisi dinamica FEM tipo "explicit dynamics", tenendo in considerazione il comportamento del materiale da costruzione ad elevati strain-rate e fino a rottura.

3. Descrizione dell'attrezzatura

Il reattore oggetto della presente memoria (Figura 1) è costituito da un cilindro ad asse verticale lavorato da barra e dotato di flange superiori e fondo piano inferiore opportunamente raccordato (1). Il cilindro è dotato di coperchio (3), sempre lavorato da barra, e connesso allo stesso tramite C-clamp in acciaio al carbonio (2, 5) dotate di bulloni serrati "in spinta" sulla sua superficie superiore (4). Non sono presenti saldature di composizione e la tenuta del giunto è garantita da una guarnizione in grafite sostituita ad ogni ciclo di lavoro (6).

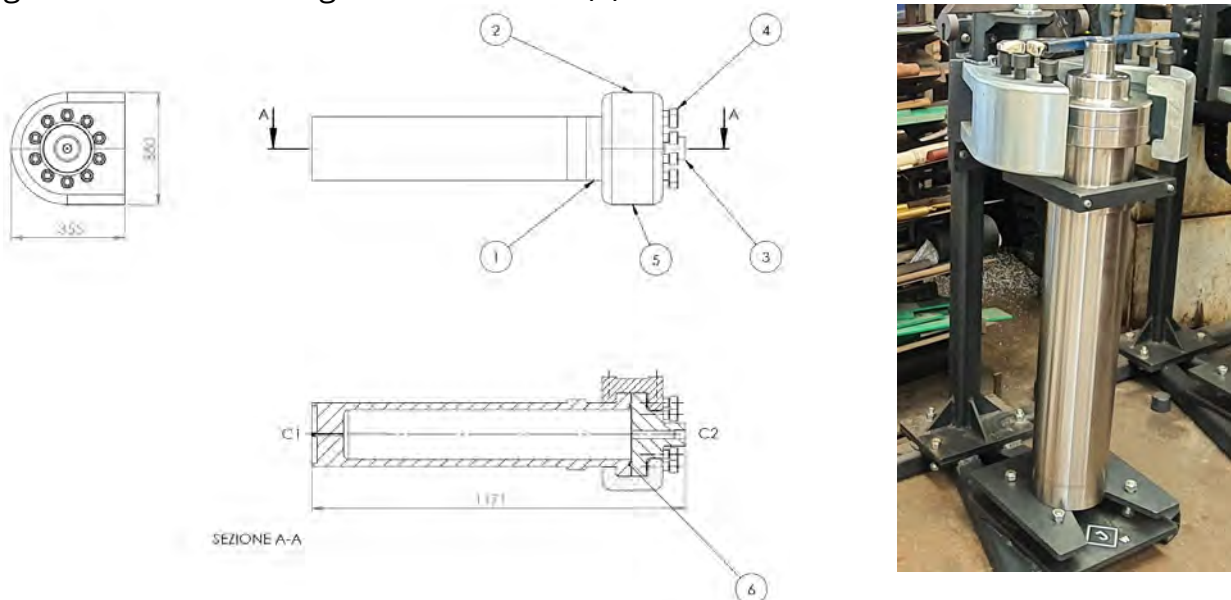


Figura 1. Schema del reattore e assieme dell'apparecchio in prova idraulica.

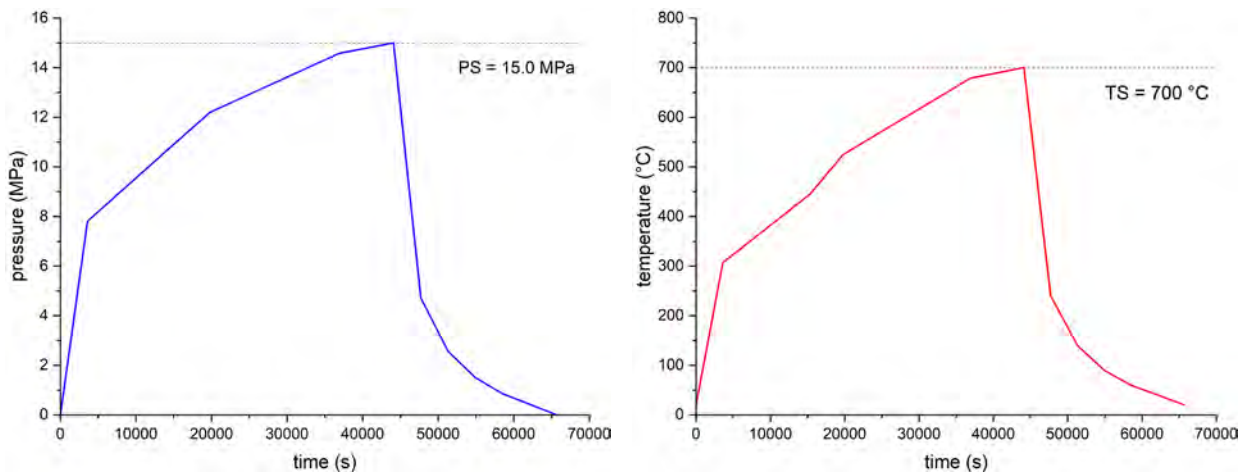


Figura 2. Ciclo di funzionamento (pressione e temperatura).

I dati di progetto dell'attrezzatura, e la conseguente classificazione ai sensi dell'Allegato II della Direttiva PED, sono riassunti di seguito:

| | |
|---------------------------------|-----------------------------|
| Pressione di progetto (PS) | -1.0 / 150.0 barg |
| Temperatura di progetto (TS) | 700 °C |
| Capacità | 18.9 l |
| Fluido di lavoro | CO ₂ (PED Gr. 2) |
| Categoria di rischio | III (Tabella 2) |
| Diametro cilindro | 200 mm |
| Materiale reattore | ASME SB-446-2 |
| Materiale ganasce | ASME SA-350-LF2 |
| Materiale bulloni | ASME SA-320-L7 |
| Cicli a fatica reattore/bulloni | 5000/1500 |
| Vita a creep | 10000 h |
| Codice di calcolo | EN 13445-3 + API 579-1 |

Il ciclo di lavoro tipico, della durata di 18 ore, prevede una rampa di temperatura e pressione fino ai valori PS/TS (Figura 2). Il carico termico è imposto da una serie di resistenze elettriche poste sul mantello cilindrico del reattore, all'interno di una fornace di riscaldamento in refrattario. Considerando che il regime di creep per il materiale da costruzione SB-446-2 inizia convenzionalmente a 525 °C, si osserva come solo un terzo del funzionamento del reattore avvenga in condizioni di scorrimento. Un calcolo a creep semplificato, in tali condizioni, sarebbe quindi eccessivamente conservativo. La progettazione è stata quindi orientata al calcolo FEM di dettaglio in regime di creep.

4. Analisi strutturale

Il progetto del reattore è stato eseguito in conformità agli standard EN 13445-3 e API 579-1 con modalità per analisi FEM. Le tensioni ammissibili sono state calcolate in accordo a EN 13445-3 ed EN 13445-10 [8] sia per i valori indipendenti dal tempo che per quelli in regime di creep. La protezione da collasso plastico, da ratcheting e da triassialità di sforzo è stata verificata attraverso l'Annex C dello standard EN 13445-3 attraverso analisi elastica lineare con classificazione delle tensioni. Sono stati

realizzati due modelli di calcolo: il primo, assialsimmetrico, per le valutazioni globali e un secondo sub-model di dettaglio per l'analisi della bullonatura "in spinta" sul coperchio (Figura 3).

Sono stati presi in considerazione il carico meccanico da pressione interna e quello termico indotto dalle resistenze elettriche. Quest'ultimo è stato valutato tramite analisi termica nel transitorio della rampa di riscaldamento. Il campo di temperature, nel tempo, ha permesso quindi di determinare i valori di sforzo equivalente massimo indotti dal riscaldamento, e di combinarli con quelli dovuti alla pressione (Figura 4). Si nota, inoltre, come solo la porzione cilindrica dell'apparecchio, e in parte quella del raccordo col fondo inferiore, siano esercitate effettivamente in regime di creep.

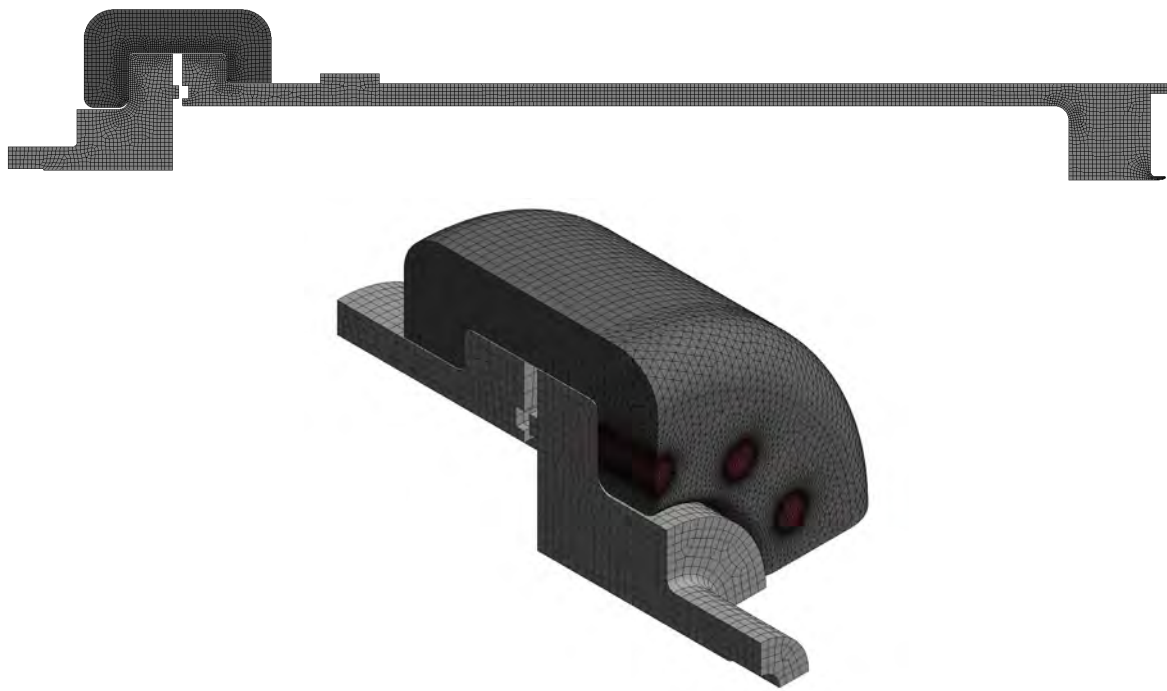


Figura 3. Modelli FEM del reattore.

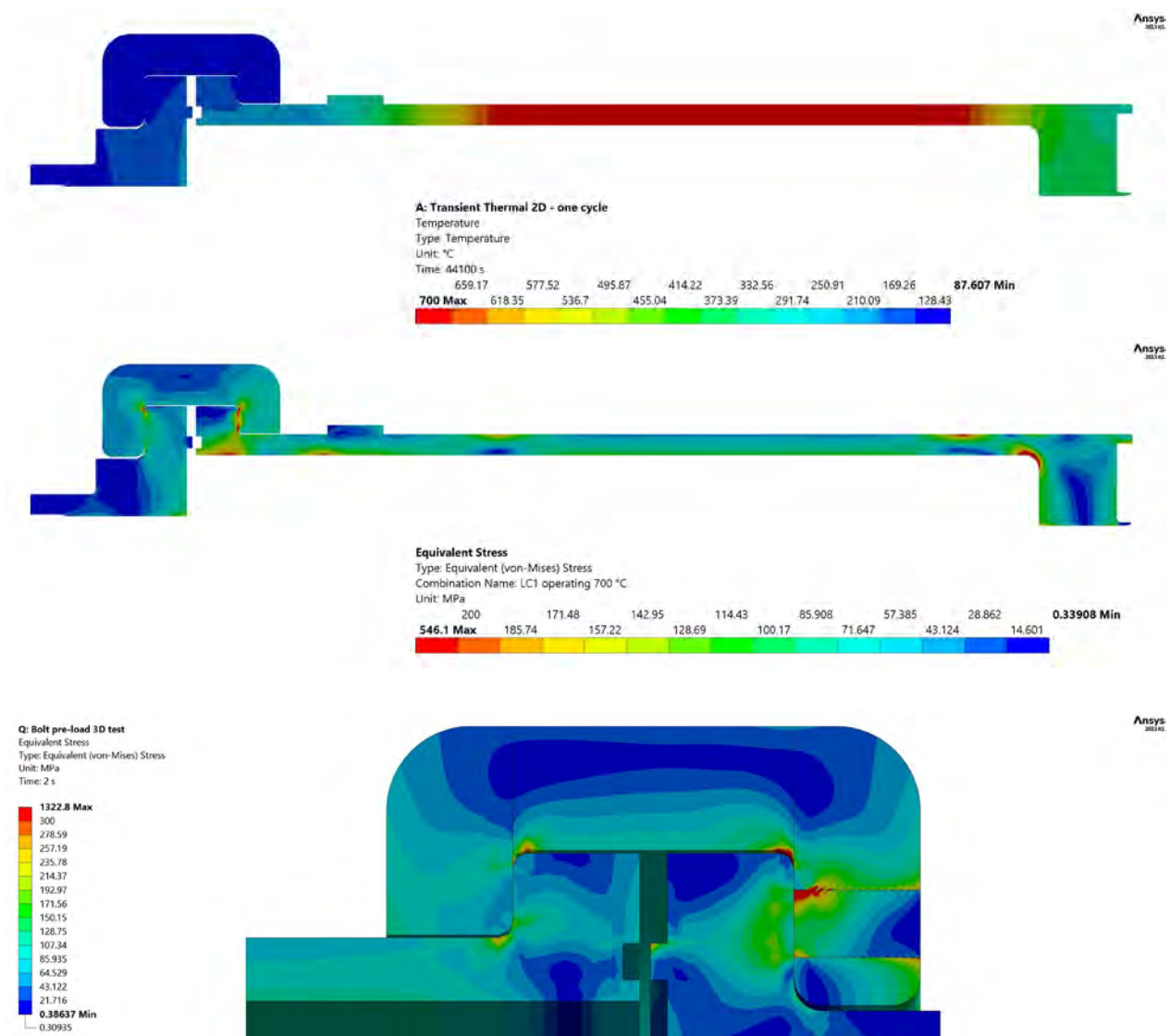


Figura 4. Campo termico nel reattore (in alto) e sforzo equivalente di Von Mises nelle membrature e nel giunto a clamp per azione di tutti i carichi di progetto (in basso).

I risultati dell'analisi elastica lineare, in termini di sforzo equivalente di Von Mises, sono stati utilizzati per il calcolo della vita a fatica dell'attrezzatura e dei bulloni. Per i componenti fino a 427 °C sono state utilizzate le curve di fatica dello standard API 579-1 Annex 14B, mentre, per quelli fino a 700 °C, i dati in temperatura forniti dal fabbricante del materiale (Figura 5). Con riferimento a questi ultimi, si nota come tutti i punti siano, di fatto, al di sotto del limite di endurance della superlega a 700 °C, pesato per lo sforzo medio, e, quindi, posseggano vita infinita. Le membrature esterne alla fornace di riscaldamento, caratterizzate da elevati gradienti termici, hanno invece limitato la vita a fatica a 5000 cicli per le C-clamp in acciaio al carbonio e a 1500 cicli per i bulloni.

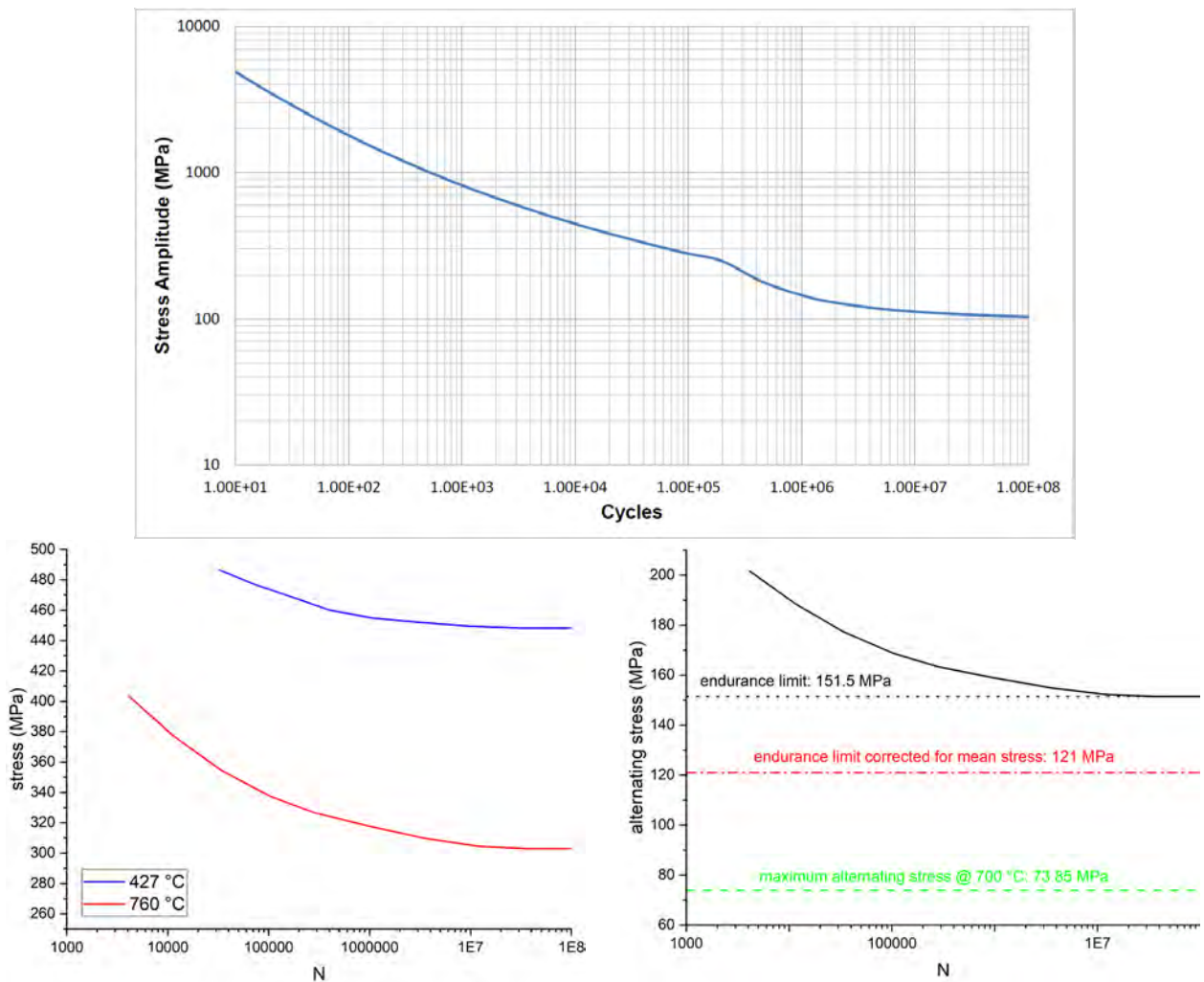


Figura 5. Curve di fatica per la superlega di nickel tipo Inconel 625 fino a 427 °C (sopra) e fino a 760 °C (sotto).

L'analisi a creep ha reso necessaria la caratterizzazione completa del materiale, sia in termini di creep-strain che in termini di time-to-rupture (Figura 6). Le curve di creep, fornite dal fabbricante del materiale, sono state interpolate attraverso la power-law di Norton:

$$\dot{\epsilon} = A \cdot e^{-Q/RT} \cdot \sigma^n \quad (1)$$

I dati a rottura sono stati invece introdotti in funzione del parametro di Larson-Miller, funzione dello sforzo equivalente attraverso il modello di polinomiale fornito dall'Annex 10B dell'API 579-1, che ben rappresenta i valori sperimentali:

$$LMP = T \cdot (\log t_r + C) = A_0 + A_1 \sigma + A_2 \sigma^2 + A_3 \ln(\sigma) \quad (2)$$

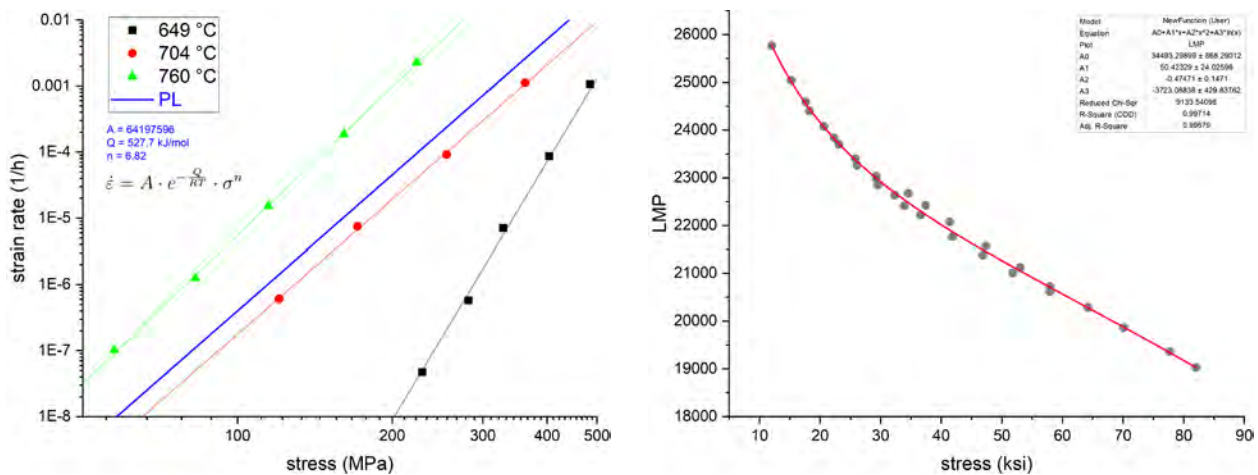


Figura 6. Curve di creep e parametro di Larson-Miller.

L'analisi condotta è stata di tipo elastoplastico nel dominio del tempo, considerando 5000 cicli termo-meccanici. Il danno da creep, valutato in conformità alla Part 10 dello standard API 579-1 e in funzione dello sforzo equivalente effettivo, pesato per gli effetti di triassialità, è stato calcolato al singolo passo di integrazione tramite custom user-subroutine in Fortran all'interno del software FEM:

$$D = \sum_i \frac{t_i}{L_i} \quad L = 10^{\left(\frac{1000 \cdot LMP(S_e)}{T+460}\right)} - C \quad (3)$$

La distribuzione del danno da creep a 5000 cicli è riportata in Figura 7 insieme alla curva di accumulo nel tempo. Come si può osservare, esso è estremamente basso a causa della permanenza limitata nel regime di creep all'interno del singolo ciclo operativo del reattore. Il danno combinato da creep-fatica è stato infine valutato in accordo alla Figura 10.35 del codice API 579-1, applicando un criterio di accettabilità pari a 0.15. I due punti di controllo, all'interno e all'esterno dal regime di creep, sono presentati in basso a destra in Figura 7.

5. Analisi dei rischi e protezione passiva del reattore

La superlega di nickel tipo Inconel 625 è caratterizzata da una matrice austenitica dovuta all'alto contenuto di Ni (58% min.) che le conferisce le elevate caratteristiche meccaniche e un'ottima resistenza alla corrosione. La presenza di Cr (20% min.) e Mo (8% min.) garantisce inoltre un'elevata resistenza a creep ad alta temperatura. Nonostante le eccellenti proprietà, tali leghe sono vittima di meccanismi di invecchiamento a caldo nel range di temperatura 600 – 800 °C, a causa della precipitazione di fasi g'' e d e di carburi a bordo del grano austenitico, con conseguente infragilimento a caldo.

L'analisi dei rischi, condotta in sede di certificazione PED e in conformità all'Allegato I della Direttiva, ha permesso di identificare questa criticità, non sanabile in sede di progetto e quindi trattabile unicamente come rischio residuo. Per proteggere l'Utilizzatore dell'apparecchiatura dal potenziale rischio di cedimento fragile durante il normale funzionamento, è stato progettato un sistema di contenimento del reattore, atto a garantire la protezione passiva da sovrappressione (blast-load) e da proiezione di frammenti. Tale sistema, fabbricato in carpenteria metallica, doveva inoltre possedere adeguate caratteristiche di manovrabilità in modo da poter essere movimentato durante le fasi di apertura e carico/scarico del reattore. Per tale motivo, la progettazione è stata eseguita tramite analisi FEM tipo "explicit dynamics" attraverso il software commerciale ANSYS Autodyn. Tale tipo di simulazione permette di studiare il comportamento del materiale in transitori dinamici estremamente brevi (0.01 - 0.001 s), adottando il metodo esplicito di integrazione nel tempo, ottimale nel caso di analisi non-lineari ad elevati strain-rate.

Il modello del sarcofago è stato preparato per la simulazione e la mesh, di tipo lagrangiano, è stata ottimizzata per analisi di tipo esplicito utilizzando elementi lineari aventi una dimensione minima di 1.0 mm e tali da garantire la stabilità della soluzione nell'intervallo di integrazione previsto pari a $5 \cdot 10^{-6}$ s (Figura 8). Per l'analisi di blast-load, la mesh del fluido interno ed esterno alla camera (aria) è stata invece definita di tipo euleriano ed è stato adottato il metodo del TNT-equivalente per simulare la propagazione dell'onda d'urto all'interno del sarcofago. In particolare, l'energia immagazzinata è stata calcolata come il massimo tra il lavoro di espansione isoterma e adiabatico del gas immagazzinato nel reattore [9] ed è risultata pari a 1286.6 kJ. Il punto di innesco è stato posizionato in posizione baricentrica rispetto al reattore (Figura 8 - destra).

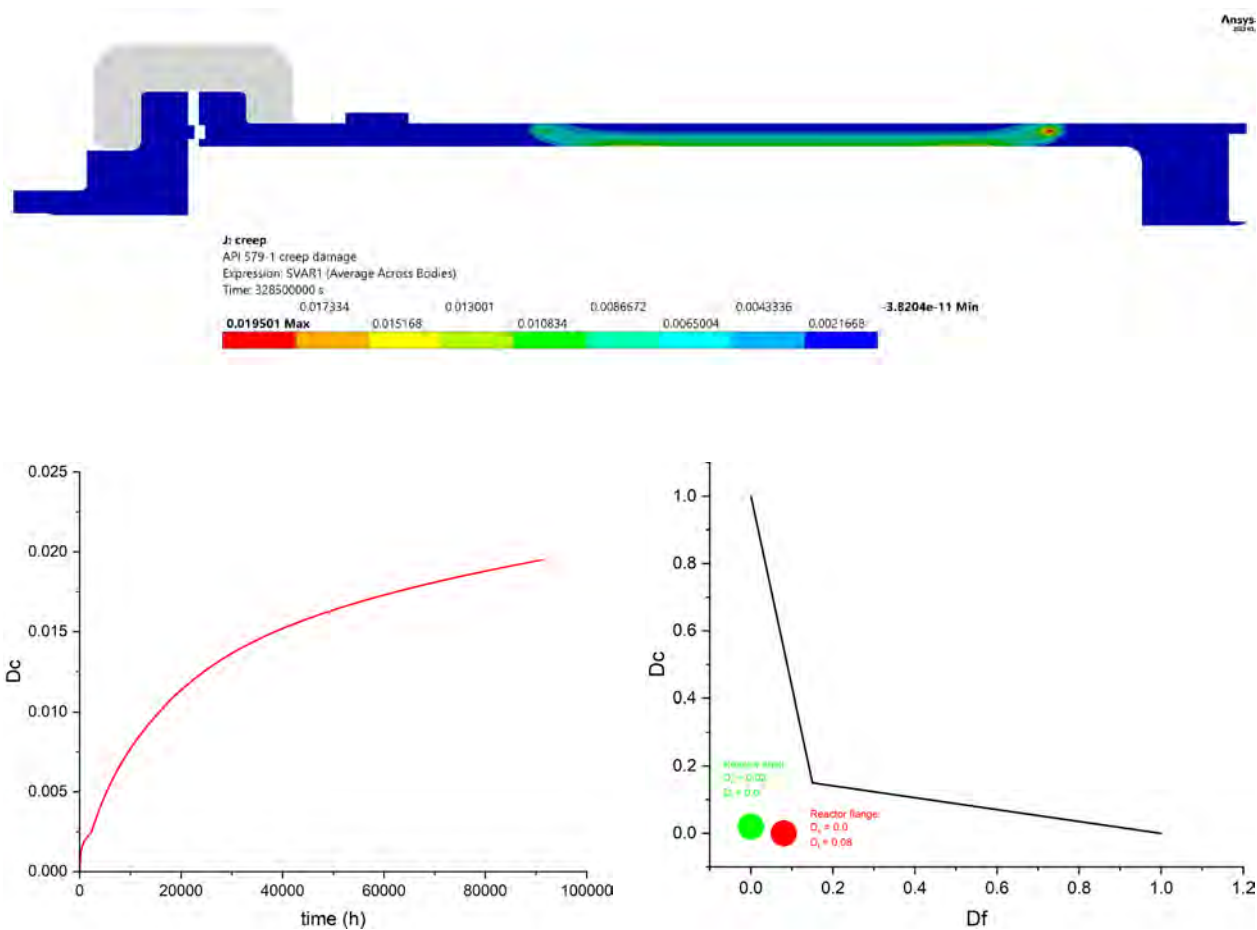


Figura 7. Danno da creep secondo API 579-1 nel reattore a 5000 cicli, in funzione del tempo e verifica del danno combinato creep-fatica.

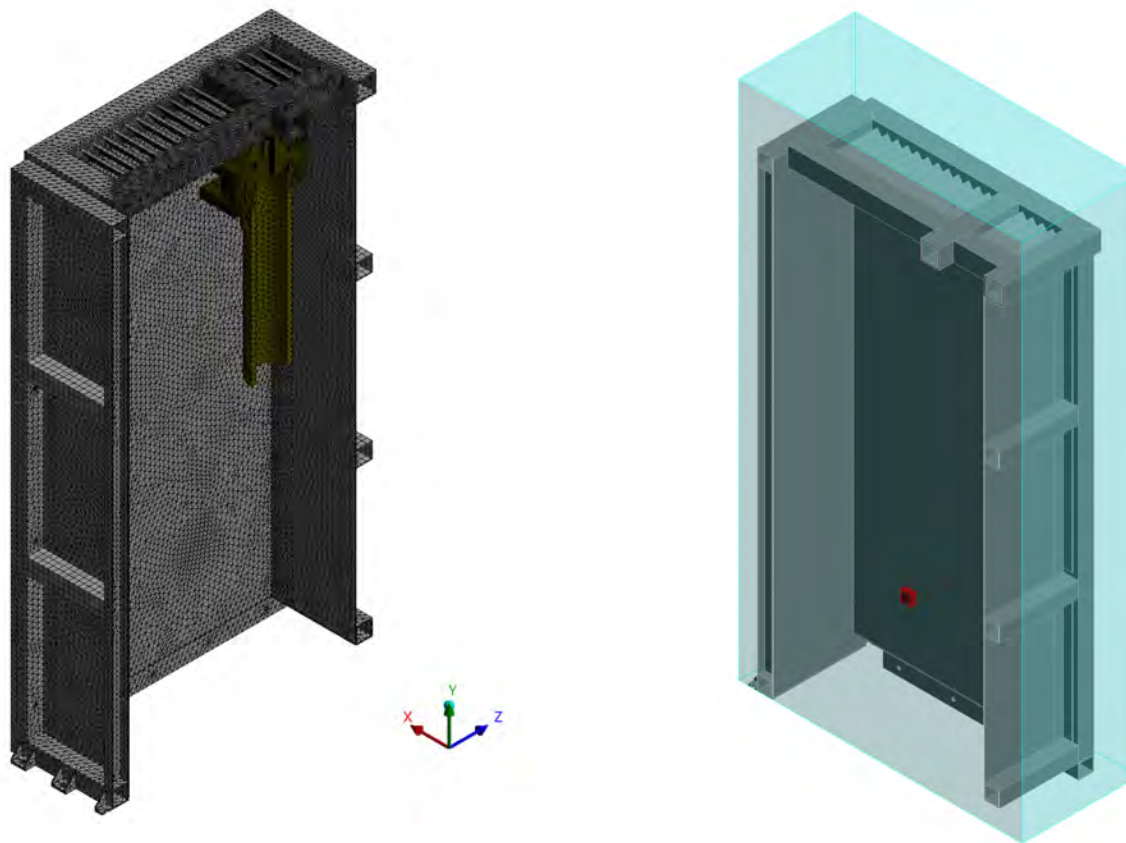


Figura 8. Mesh lagrangiana del modello FEM per il progetto del sistema di contenimento (sinistra) e dominio euleriano del fluido nell'analisi di blast-load. Il blocco di TNT corrispondente all'energia immagazzinata nel reattore è mostrato in rosso.

L'analisi è stata condotta includendo l'incrudimento del materiale ad elevati strain-rate, il relativo criterio di collasso secondo la teoria di Johnson & Cook e utilizzando le costanti dell'acciaio da costruzione S355 [10]:

$$\sigma_y = (X + Y\varepsilon_p^l) \cdot (1 + Z \cdot \log \dot{\varepsilon}_{pn}) \cdot (1 - T_H^m) \quad (4)$$

$$\varepsilon_f = (D_1 + D_2 e^{D_3 P/\sigma}) \cdot (1 + D_4 \log \varepsilon_{pn}) \cdot (1 + D_5 T_H^m) \quad (5)$$

La simulazione ha permesso di cogliere il comportamento del materiale nel transitorio di scoppio e di urto di frammenti ad alta velocità. Per il secondo caso, ci si è posti nella condizione sfavorevole in cui tutta la testa del reattore impatti sulla porzione superiore del contenimento con una velocità calcolabile tramite le formule di letteratura per frammenti assimilabili a razzi [9]. Nel caso in esame essa è risultata pari a 61.4 m/s. L'analisi ha inoltre permesso di valutare la resistenza della struttura

perché, in caso di raggiungimento del limite del materiale (failure), gli elementi relativi sarebbero stati deattivati, modellando la perdita di capacità portante della struttura. La Figura 9 illustra lo sforzo di Von Mises nella camera al passaggio dell'onda di pressione per due istanti di tempo ($4 \cdot 10^{-4}$ e $7.5 \cdot 10^{-4}$ s):

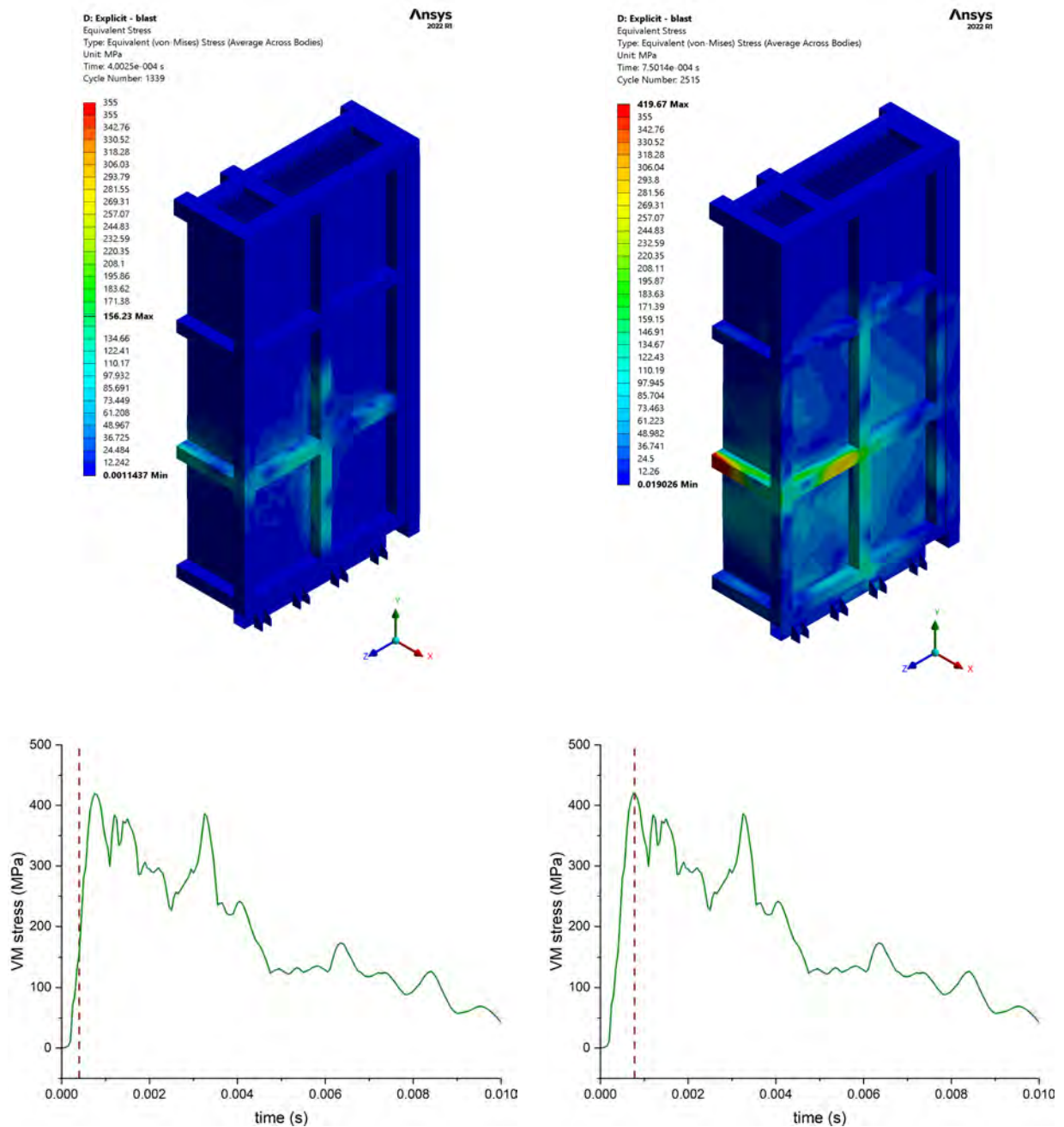


Figura 9. Sforzo di Von Mises al passaggio dell'onda di pressione (primo picco di sforzo - destra).

La Figura 10 presenta invece la struttura del sarcofago nella configurazione finale di progetto, scorrevole su rotaia in fase di apertura e chiusura, e il danno ottenuto dalla simulazione per proiezione della porzione superiore del reattore a seguito di frattura fragile del cilindro. Si può osservare come la struttura si deformi plasticamente in maniera rilevante ma senza arrivare a rottura dei profili di trattenuta (nessuna deattivazione degli elementi per raggiungimento del criterio di failure).

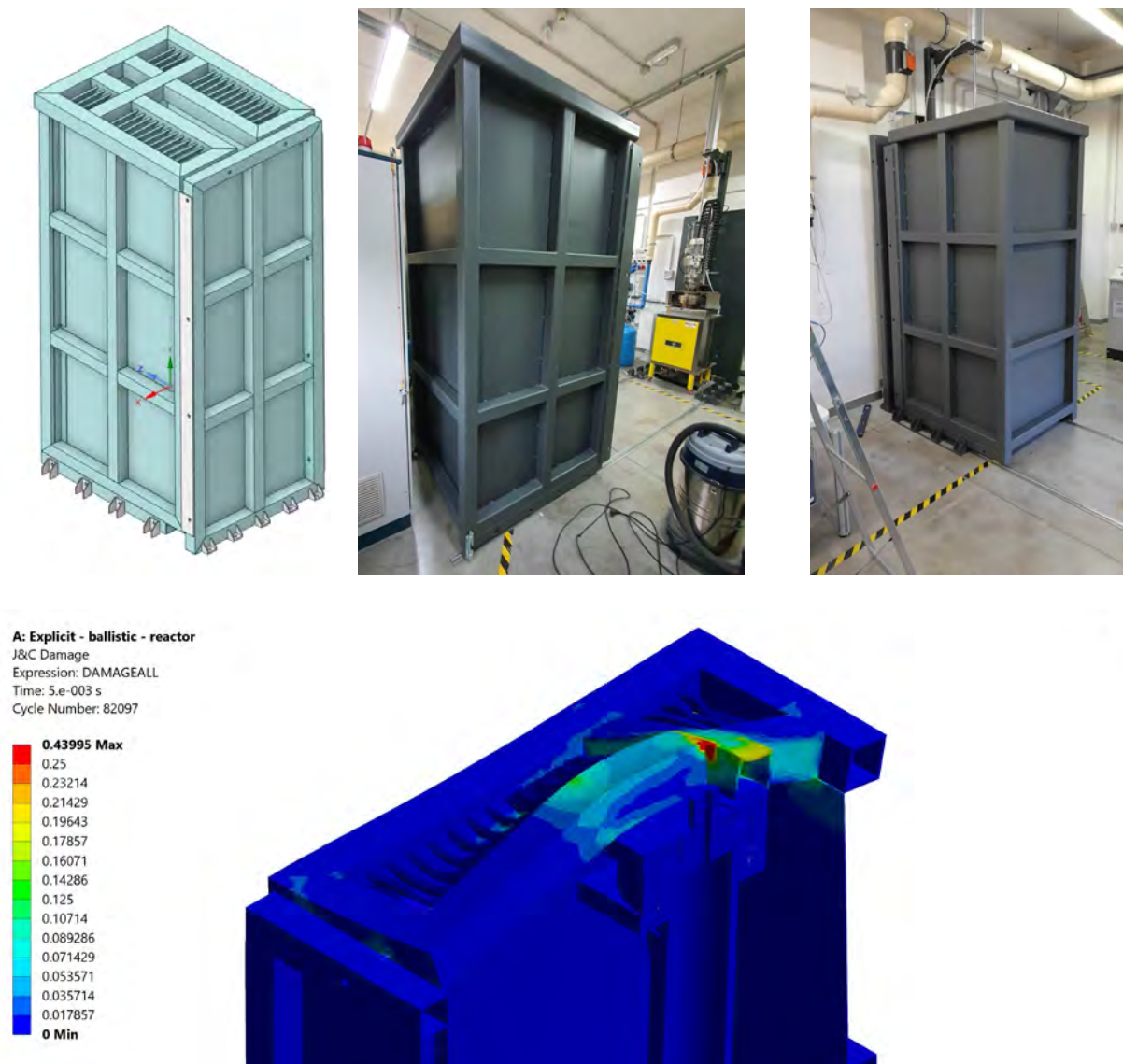


Figura 10. Sarcofago di protezione scorrevole su binari: installazione e dettaglio del danno massimo in caso di proiezione di frammenti (deformata scala 1:1).

L'analisi FEM dinamica ha permesso quindi di verificare il contenimento rispetto al collasso ultimo, verifica difficilmente attuabile con metodi tradizionali, e di verificare il rispetto dei RES come richiesto dalla Direttiva PED.

6. Conclusioni

La presente memoria ha illustrato un case-study relativo alla certificazione PED di un reattore per carbonatazione in superlega di nickel operante in regime di creep-fatica. L'attrezzatura è stata progettata in accordo agli standard EN 13445-3 e API 579-1 attraverso analisi FEM di dettaglio, valutando in particolar modo il danno da creep e da fatica come previsto dall'Allegato I della Direttiva. Tale approccio ha permesso di ottenere una stima realistica della vita utile dell'attrezzatura, rinunciando a semplificazioni e ipotesi eccessivamente conservative.

In sede di analisi dei rischi e di valutazione del rispetto dei RES PED, è inoltre emersa una criticità relativa a possibili meccanismi di infragilimento della superlega di nickel durante l'esercizio ad alta temperatura. Il rischio è stato affrontato progettando un sistema meccanico di protezione passiva (sarcofago) utilizzando un'analisi FEM dedicata tipo "explicit dynamics" che ha permesso di ottimizzare il rapporto resistenza/manovrabilità della struttura, garantendo allo stesso tempo la sicurezza dell'impianto in esercizio.

7. Bibliografia

- [1] EN 13445-3 "Recipienti a pressione non esposti a fiamma - Parte 3: Progettazione", 2021
- [2] ASME "API 579-1/ASME FFS-1 Fitness-For-Service", American Society of Mechanical Engineers, New York, 2021
- [3] "Direttiva 2014/68/UE del Parlamento Europeo e del Consiglio del 15 maggio 2014 concernente l'armonizzazione delle legislazioni degli Stati membri relative alla messa a disposizione sul mercato di attrezzature a pressione"
- [4] Abolghassemi S., Williamson J., Lindley T. C., Lee P. D. "Embrittlement of alloy 625 and effect of remedial treatments" *Journal of Materials Design and Applications* 2014; 230:1
- [5] Moore I. J., Taylor J. I., Tracy M. W., Burke M. G., Palmiere E. J., "Grain coarsening behaviour of solution annealed Alloy 625 between 600–800 °C" *Materials Science and Engineering: A* 2017; 682:402-409
- [6] Mathew M. D., Parameswaran P., Bhanu Sankara Rao K. "Microstructural changes in alloy 625 during high temperature creep" *Materials Characterization* 2008; 59:508-513
- [7] Mathew M. D., Bhanu Sankara Rao K., Mannan S. L. "Creep properties of service-exposed Alloy 625 after re-solution annealing treatment" *Materials Science and Engineering A* 2004; 372:327-333

[8] EN 13445-10 "Recipienti a pressione non esposti a fiamma - Parte 10: Requisiti aggiuntivi per recipienti in pressione in nichel e leghe di nichel", 2021

[9] Gurnari G., Mulè G., Palumbo N. "La valutazione del rischio nella prova a pressione di attrezzature metalliche", INAIL SAFAP 2012

[10] Soliman H. A., Shash A. Y., El-Hossainy T. M., Abd-Rabou M. "Cutting forces and crater wear prediction in orthogonal cutting using two approaches of finite element modeling" *Engineering Reports* 2020; eng2.12240

Dalla costruzione all'esercizio in sicurezza dei recipienti criogenici fissi isolati sottovuoto. Casi studio

R. Acerboni¹, N. Altamura², E. Bemporad³, G. Gorrino⁴, G. Vaccaro⁵

¹Inail - Uot di Venezia

²Inail - Uot di Bari

³Inail - ON 0100

⁴Inail - Uot di Roma

⁵Inail - Uot di Palermo

Abstract

La memoria intende trattare della normativa in materia di fabbricazione, installazione e verifica dei recipienti criogenici fissi isolati sottovuoto, dai Requisiti essenziali di sicurezza, alla messa in servizio e verifiche periodiche di queste particolari attrezzature a pressione per le quali occorre adottare alcune precauzioni, viste le proprietà particolari dei gas criogenici contenuti.

La memoria, dopo una breve sintesi delle peculiarità rilevabili nelle norme tecniche armonizzate alla direttiva 2014/68/UE o PED (Pressure Equipment Directive) specifiche di settore rispetto quelle generali con particolare riferimento ad aspetti potenzialmente critici, tratterà alcuni casi studio tra cui:

- La possibilità di installazioni all'interno, ove la classica installazione all'aperto non sia possibile, esaminando quelli che sono i rischi che ne derivano e le azioni intraprese per l'eliminazione o mitigazione degli stessi;
- Analisi di gestione di serbatoio di CO₂ liquida con temperatura di targa -40/+50 °C ai fini del non superamento dei limiti di temperatura fissati in costruzione;
- Esame documentale di una dichiarazione di messa in servizio di un insieme criogenico con verbale di accertamento degli accessori di sicurezza e controllo, dalla quale non risulta presente la sonda LTP per il rischio di infragilimento a valle del vaporizzatore.

Keywords: criogenici, rischio infragilimento.

1. I recipienti criogenici fissi

1.1 Funzionamento e caratteristiche

Secondo la EN 13458-1 [1], per recipiente criogenico fisso si intende un recipiente termoisolato progettato per l'uso con uno o più fluidi criogenici in un luogo stazionario, consistente in un recipiente interno, un involucro esterno ed una rete di tubazioni, non destinato ad essere trasportato quando è pieno, ma trasportabile da una posizione fissa ad un'altra, vuoto o contenente residui marginali di fluido

criogenico o gas, costituente un insieme completo pronto per la messa in servizio. Solitamente l'involucro esterno è realizzato in acciaio al carbonio; ad esso, mediante l'utilizzo di staffe metalliche di centraggio e fissaggio si salda l'involucro interno realizzato in acciaio inox. Tra i due involucri si crea il termoisolamento grazie a tre effetti:

- a) effetto riduzione irraggiamento: eseguito grazie all'utilizzo della perlite;
- b) effetto riduzione calore di convezione: attraverso realizzazione del vuoto;
- c) effetto riduzione della conduzione di calore: raggiunto con la separazione fra i due involucri.

Fermo restando che in minima parte i fluidi criogenici potranno utilizzarsi direttamente nella fase liquida (es. azoto liquido per laboratori veterinari o industria alimentare), l'utilizzo più frequente avviene nella fase di vapore criogenico, sfruttando la naturale propensione dei fluidi criogenici ad evaporare alla temperatura ambiente. Infatti, sarà proprio il termoisolamento che preserverà l'equilibrio liquido/vapore del fluido contenuto, mentre il settaggio di una valvola pressurizzatrice e il relativo funzionamento garantiranno la cosiddetta "rimessa in pressione" ogni qualvolta verrà richiesto del fluido criogenico sottoforma di vapore alle utenze. In realtà, in caso di prelievo, ciò che viene prelevato dall'involucro interno in inox sarà la fase liquida; questa attraverso il passaggio all'interno di uno scambiatore di calore fluido/aria, chiamato "evaporatore", solitamente situato all'esterno del recipiente criogenico, permetterà la sua evaporazione e quindi l'utilizzo immediato o l'accumulo in appositi recipienti.

Evidentemente, l'afflusso di liquido criogenico verso l'esterno produce una riduzione di volume della parte liquida all'interno del recipiente in inox, rompendo quell'equilibrio esistente inizialmente alla pressione e temperatura del recipiente interno. Per ripristinare immediatamente tale equilibrio, il volume di liquido perso verrà rimpiazzato dalla fase di vapore che potrà generarsi grazie all'apertura della valvola pressurizzatrice che permetterà il passaggio di ulteriore liquido freddo verso uno scambiatore ausiliario fluido/aria, denominato evaporatore pressurizzatore (o ausiliario), solitamente alloggiato nella parte inferiore del recipiente esterno, il quale farà evaporare il liquido convogliando il relativo vapore sulla parte superiore del recipiente in inox, fino al raggiungimento della nuova pressione di equilibrio per la temperatura insistente nel recipiente in inox.

Come si evince da quanto sopra, il meccanismo naturale di rimessa in pressione all'atto di ciascun prelievo dall'utenza è fortemente influenzato dal regolare funzionamento della valvola pressurizzatrice e dell'evaporatore ausiliario, mentre il corretto funzionamento dell'evaporatore principale garantirà il "naturale" afflusso verso l'esterno di vapore criogenico alla temperatura ambiente. Regolando la pressione minima di intervento della valvola pressurizzatrice verrà permesso la riduzione del volume liquido criogenico senza l'eventualità di completo svuotamento del recipiente interno in inox, mentre evitando la formazione di ghiaccio sugli evaporatori fluido/aria, si garantirà il continuo e corretto scambio

termico necessario per l'utenza (all'uopo saranno necessari precisi controlli delle portate richieste dall'utenza, adeguati calcoli delle superfici di scambio, corretta manutenzione, ecc.).

Non sempre gli evaporatori principali sono del tipo fluido/aria, ma, per alcune esigenze particolari dell'utenza, potranno utilizzare come fluido secondario anche l'acqua a temperatura ambiente, l'acqua calda, il vapore, ecc., richiedendo un ulteriore controllo sugli impianti di alimentazione di quest'ultimi.

Se, in situazioni particolari, che solitamente coincidono con lo svuotamento totale della fase liquida, si dovesse avere un innalzamento della pressione (es. per la perdita del vuoto), potranno scattare i dispositivi di protezione quali dischi di rottura e/o valvole di sicurezza adeguatamente dimensionate, di cui tutti gli apparecchi criogenici saranno corredati.

I gas liquefatti refrigerati, identificati come fluidi criogenici sono prevalentemente: azoto, ossigeno, argon, anidride carbonica, protossido di azoto, aria e idrogeno, nonché tutti gli altri fluidi che hanno un notevole utilizzo nell'ambito industriale, civile, sanitario, militare, ecc.

Sicuramente i due parametri che caratterizzano questi fluidi sono la pressione e la temperatura critica (P_c e T_c); in particolare quando un liquido criogenico si trova ad una pressione e temperatura con valori superiori ai valori "critici", il passaggio nella fase aeriforme sarà immediato e si trasformerà tutto in gas criogenico con la successiva impossibilità di ritornare in forma liquida per semplice compressione (cosa che invece potrà avvenire per un aeriforme in forma di vapore). A titolo di esempio, in tabella 1 sono indicati alcuni valori delle pressioni e temperature critiche dei fluidi criogenici principalmente usati.

| Specie chimica | Temperatura critica | | Pressione critica | | Densità critica (g/cm ³) |
|-------------------------------|---------------------|-------|-------------------|--------|--------------------------------------|
| | °C | K | atm | MPa | |
| He | -267,9 | 5,3 | 2,3 | 0,229 | 0,069 |
| H ₂ | -239,9 | 33,3 | 12,8 | 1,297 | 0,031 |
| Ne | -228,7 | 44,5 | 26,9 | 2,726 | 0,484 |
| N ₂ | -147,1 | 126,1 | 33,5 | 3,394 | 0,311 |
| Ar | -122,3 | 150,9 | 48,0 | 4,864 | 0,531 |
| O ₂ | -118,4 | 154,8 | 50,1 | 5,076 | 0,430 |
| CH ₄ | -82,1 | 191,1 | 45,8 | 4,641 | 0,162 |
| CO ₂ | 31,0 | 304,2 | 72,9 | 7,387 | 0,460 |
| C ₂ H ₈ | 32,2 | 305,4 | 48,2 | 4,884 | 0,211 |
| N ₂ O | 36,5 | 309,7 | 71,7 | 7,265 | 0,450 |
| NH ₃ | 132,5 | 405,7 | 112,5 | 11,399 | 0,235 |

Tabella 1. Pressioni e temperature critiche di fluidi criogenici principalmente utilizzati

Come si potrà osservare, solo alcuni fluidi tra i più utilizzati, come la CO₂ o il N₂O, hanno una temperatura critica comparabile con la temperatura ambiente; tutti gli altri hanno un valore di T_c molto basso, e questo costituisce la principale motivazione di costruire il recipiente interno in inox. Infatti, per continuare ad avere buona duttilità e tenacità alle basse temperature, l'acciaio da utilizzare dovrà essere del tipo resiliente al fine di scongiurare il pericoloso fenomeno della fragilità (Acciaio Inox).

1.2 Normativa di riferimento e aspetti peculiari

Fino al 29 maggio 2002 gli apparecchi criogenici potevano essere costruiti secondo i regolamenti nazionali, che solitamente prevedevano un coacervo di norme "osmotiche" fra la fase di costruzione e la fase di esercizio di un particolare apparecchio in pressione. Oltre la suddetta data è entrato in vigore la Direttiva 97/23/CE, a sua volta abrogata e sostituita dalla direttiva 2014/68/UE.

Una delle conseguenze immediate della nuova normativa di costruzione è stata senz'altro la scelta di far commercializzare gli apparecchi criogenici come "Insiemi" e non più come singoli recipienti in pressione. In tale ottica, il vantaggio sarà principalmente costituito da una migliore gestione amministrativa dell'impianto e soprattutto da una migliore gestione dell'applicazione del d.m. 329/04 per quanto riguarda l'esercizio, almeno dal 12 febbraio 2005.

Analogamente a quanto avviene per la costruzione per la quale si possono applicare diverse norme tecniche armonizzate di settore che supportano ai fabbricanti nel soddisfare i requisiti essenziali di sicurezza (RES) della Direttiva 2014/68/UE (es. EN 13458-1 [1], EN ISO 21028-1 [2], EN ISO 21028-2 [3], EN 1629 [4], EN 1797 [5], EN 13458-2 [6], EN 21009-2 [7], , EN 13371 [8], EN 13648-1 [9] e EN 13648-2 [10], EN ISO 21013-3 [11], ecc.), anche per l'esercizio sono previste le specifiche tecniche, tra l'altro richieste dall'articolo 3 del d.m. 329/04. In particolare, sono state pubblicate le UNI/TS 11325-6 [12] e UNI/TS 11325-12 [13] in merito all'esercizio degli apparecchi in pressione, ma non risulta ancora emesso il decreto di recepimento da parte dei Ministeri competenti; pertanto, ai fini dell'esercizio si possono ancora applicare, per quanto non in contrasto con la normativa europea, tutti i precedenti strumenti normativi non abrogati e l'afferente disciplina (r.d. 824/1927, d.m. 21.05.1974, circolari ANCC, circolari ISPESL, ecc.).

Alcuni degli aspetti peculiari di settore, emergono chiaramente dalle norme armonizzate sopra citate, oltre che da altri riferimenti correlati alla PED, in relazione a specifici RES previsti dalla PED stessa e pertanto si ritiene utile richiamare l'attenzione su di essi. Ad esempio, le osservazioni preliminari ai RES richiamano il fabbricante all'obbligo di analizzare i pericoli e i rischi e di interpretare ed applicare i RES stessi in modo da tenere conto dello stato della tecnica e della prassi al momento della progettazione e della fabbricazione, nonché dei fattori tecnici ed economici, da conciliare con un elevato livello di protezione della salute e della sicurezza. Quest'ultimo deve corrispondere all'uso indicato nelle informazioni sul

prodotto e ciò è particolarmente importante nei casi in cui si rischia un uso scorretto del prodotto [14]. In particolare, nell'assicurarsi che siano considerati tutti i rischi ragionevolmente prevedibili legati all'uso dei recipienti è evidente la necessità di:

- una visione integrata dei rischi tra l'impianto di stoccaggio e quello di utilizzazione [15] e, conseguentemente
- la definizione accurata dei limiti di batteria del recipiente nella sua accezione di insieme.

Con riferimento invece ai RES relativi alla progettazione ed in particolare ai carichi di progetto, per il recipiente interno, sia in condizioni normali che di prova idraulica, è sempre aggiunto 1 bar per tenere conto del vuoto esterno [6], mentre ai fini della selezione di un materiale resistente all'uso previsto, i materiali non metallici vanno evitati o selezionati con cura, nonché utilizzati in quantità limitata, in quanto buona parte di essi presentano un alto rischio di autoaccensione quando sono a contatto con l'O₂ [5]. Inoltre, nel caso della prova idraulica qualora l'acciaio austenitico entri in contatto con l'acqua, vanno controllati il contenuto di cloruro dell'acqua e la durata di esposizione, al fine di evitare la formazione di cricche da tensocorrosione [6].

Per quanto riguarda gli accessori di sicurezza (RES 2.11.1) occorre prestare attenzione agli apparati multi-gas i cui accessori di sicurezza richiedono un dimensionamento cautelativo. Inoltre, con specifico riferimento alla conformità ai principi di progettazione appropriati per ottenere una protezione adeguata ed affidabile, inclusi un sistema «fail-safe», un sistema a ridondanza, la diversità e un sistema di autocontrollo, nessuna delle norme armonizzate di riferimento prevede un SIL minimo per i dispositivi di misurazione, controllo e regolazione per la sicurezza o SRMCR [9, 6].

Se consideriamo poi i RES riferiti ai materiali, secondo la Guideline PED G-17 [16] l'approccio che si può utilizzare per decidere se un tipo di acciaio selezionato per una parte pressurizzata richieda specifiche proprietà d'impatto, è basata sull'analisi dei rischi effettuata dal fabbricante e prevede essenzialmente la misura delle proprietà d'impatto, ma quest'ultima non è l'unica via. La misura può non essere richiesta nei casi in cui non vi siano dubbi circa il rispetto del RES relativo a una tenacità sufficiente per evitare la rottura fragile, come per la maggioranza degli acciai inox austenitici. Però la stessa Guideline specifica che la storia di uso sicuro da sola non può sostituire la necessità di specificare le proprietà di impatto, che infatti ritroviamo nelle specifiche norme armonizzate [2], come auspicabile considerando che questa nozione è indissolubilmente legata a un particolare codice, a un insieme di fattori di sicurezza e a una filosofia di sicurezza e non può quindi essere necessariamente trasferita a una diversa filosofia/concetto di sicurezza. di energia di impatto.

Per quanto riguarda le aperture di ispezione (RES 2.4) non risultano necessarie qualora siano rispettati i requisiti delle relative norme armonizzate di riferimento per l'esercizio, in quanto la combinazione di materiali e fluidi porta ad escludere la

corrosione interna ed inoltre, nel caso dei recipienti isolati sotto vuoto, la presenza dell'involucro esterno ad isolamento del recipiente interno fa escludere la corrosione esterna di quest'ultimo e l'assenza di aperture garantisce il mantenimento del vuoto nell'intercapedine [6, 7].

Con riferimento alle giunzioni permanenti (RES 3.1.2) e all'esame finale (3.2.1), il controllo del recipiente interno, salvo casi particolari, deve essere effettuato mediante esame radiografico, con estensione specifica [6].

Infine, come ultimo esempio delle peculiarità riscontrabili nelle norme di settore, in fabbricazione sono previste fasi di controllo supplementari [6].

Da ultimo si richiama l'attenzione al caso di attrezzature realizzate in epoca pre-PED e quindi non marcate CE (librettate ISPEL), che debbano subire modifiche o trasformazioni consistenti destinate a cambiarne le prestazioni, la finalità o il tipo originari dopo la messa in servizio, con un impatto significativo sulla conformità alla normativa di armonizzazione dell'Unione. Queste attrezzature in assenza di libretto matricolare non possono essere certificate a seguito della modifica [17]. Nel libretto però non sempre risulta chiaro se per l'involucro interno fosse riportata la pressione di progetto o la pressione operativa quando l'involucro interno contiene il criogenico liquido.

Comunque, al di là di tutta la specifica normativa tecnica e di legge che afferisce il mondo degli apparecchi criogenici fissi (e portatili), non si dovrà mai dimenticare l'applicazione del d.lgs. 81/08, con particolare riguardo agli artt. 70, 71 e 72, nonché la corretta redazione dei documenti di valutazione dei rischi, propri e di interferenza (DVR e DUVRI), aziendali sia nella contestualizzazione dei pericoli e rischi degli apparecchi criogenici in quanto apparecchi in pressione, sia in quanto contenitori di fluidi pericolosi [18]. Infatti, all'uopo è sempre bene far riferimento alla classificazione ed etichettatura secondo il regolamento CLP (EC 1272/2008), adottato dalla ECHA (Agenzia Europea per le sostanze chimiche), obbligatoria dal 01/06/2015.

1.3 Esperienza operativa e conseguenze normative

Tra le circolari richiamate al paragrafo precedente, sicuramente quelle che spiccano per influenza sull'impiantistica e l'esercizio degli apparecchi criogenici sono state e sono le Circolari ISPEL n.53 del 23 dicembre 2003 e n.09 del 19 luglio 2004.

A seguito di un grave incidente verificatosi il 13 aprile 2003 a causa della rottura di un serbatoio in acciaio al carbonio infragilito da azoto a bassa temperatura, in uno stabilimento industriale a Caivano (NA), sono state emanate dall'ISPEL la circolare del 23 dicembre 2003, n. 53 "Adeguamento di impianti contenenti fluidi criogenici allo stato liquido da gasificare", e la circolare n. 3 del 9 marzo 2004, successivamente abrogate e sostituite dalla circolare ISPEL n. 9 del 19 luglio 2004 [19].

Il campo di applicazione di quest'ultima circolare è rivolto agli impianti che utilizzano gas ottenuti dalla gasificazione dei corrispondenti fluidi criogenici, costruiti ed

installati prima dell'entrata in vigore della PED, nonché quelli realizzati in loco mediante assemblaggio di attrezzature marcate CE costituenti una «installazione».

Le categorie di fluidi criogenici presi in esame dalla circolare sono:

- Fluidi criogenici la cui temperatura di ebollizione a pressione atmosferica è $\leq -90^{\circ}\text{C}$;
- Fluidi criogenici la cui temperatura di ebollizione a pressione atmosferica è $> -90^{\circ}\text{C}$.

I soggetti coinvolti sono:

- Proprietario o gestore dell'impianto;
- Utilizzatore;
- ISPESL / INAIL.

Per impianti in cui erano presenti recipienti in materiale non resiliente con volume $V > 25$ litri e/o tubazioni in materiale non resiliente con diametro nominale $\text{DN} > 100$ mm, la circolare al momento della sua emanazione prevedeva la presentazione all'Ispecl della seguente documentazione:

- Schema P&I dell'impianto;
- Relazione tecnica comprensiva di una analisi di rischio orientata al rischio per rottura fragile, con l'indicazione delle soluzioni individuate e relativa stima dei tempi per l'adeguamento alle disposizioni della circolare.

Per gli impianti con fluidi criogenici la cui temperatura di ebollizione a pressione atmosferica è superiore a -90°C era esclusa la presentazione della documentazione sopra elencata. Dovevano ad ogni modo essere effettuate e tenute a disposizione delle Autorità le analisi di rischio con le soluzioni adottate per il rischio dovuto a rottura fragile.

La circolare dà delle indicazioni sui contenuti dell'analisi dei rischi che in particolare deve tenere conto:

- Della tipologia dell'impianto;
- Dei rischi connessi con il non corretto funzionamento dei sistemi di riscaldamento del fluido criogenico;
- Dei rischi connessi con i sistemi di interruzione del fluido criogenico in caso di necessità e/o di emergenza;
- Delle grandezze critiche da controllare con particolare riferimento alle caratteristiche dei materiali impiegati;
- Del massimo prelievo del gas.

La valutazione dei rischi connessi alle apparecchiature finali di utilizzo (come ad esempio camere iperbariche, inertizzazioni, ecc.) è demandata al proprietario o gestore di queste.

I minimi criteri impiantistici previsti dalla circolare da adottare in funzione dell'analisi dei rischi sono:

1. Prevedere a valle del vaporizzatore due valvole automatiche (con funzione di sicurezza) che chiudano il passaggio del fluido criogenico qualora la temperatura sia inferiore a quella minima di progetto dei componenti cui il fluido è destinato (recipienti di accumulo gas, tubazioni, ecc.);
- Una valvola può anche essere del tipo modulante;

- È consentita l'installazione di una sola valvola automatica se a valle del vaporizzatore sono presenti recipienti $V \leq 25$ litri e/o tubazioni con $DN \leq 100$ mm.
- 2. Un unico sistema di sicurezza marcato CE (in IV Categoria PED) in sostituzione delle due valvole automatiche;
- 3. Tutti gli elementi costituenti l'impianto e posti a monte della prima valvola automatica devono essere in materiale resiliente;
- 4. Qualora l'utenza sia alimentata da più impianti in parallelo, ciascuno di essi deve essere separato dagli altri mediante l'installazione di due valvole di non ritorno in serie.

2. Caso studio - Installazione all'interno di serbatoio criogenico

I recipienti criogenici dove possibile dovrebbero essere installati all'aperto; nel caso studio in esame si è dovuto procedere all'installazione di un serbatoio di azoto, avente un volume di 6000 litri ed una pressione massima di esercizio di 37 bar.

2.1 Posizionamento del serbatoio

Esso è stato ricavato in un locale tecnico all'interno di un capannone industriale, nel quale solo un lato dell'area di pertinenza del serbatoio è aperto verso l'esterno come si evince dall'immagine sottostante (fig. 1).

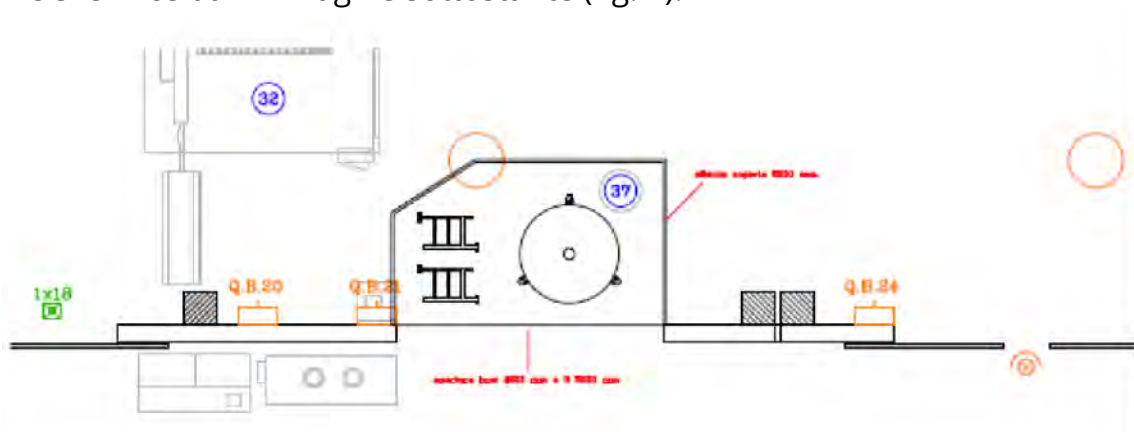


Figura 1. Locale tecnico centrale criogenica

La posizione del Serbatoio Criogenico all'interno dell'area si presenta con il quadro valvole posto con fronte al lato piazzale per consentire e facilitare le operazioni di carico da parte della cisterna.

Il quadro valvole è composto da:

- Circuito di riempimento;
- Circuito per il vuoto;
- Circuito di sicurezza;
- Circuito di misura;
- Circuito per il mantenimento della pressione interna.

2.2 Misure di sicurezza adottate

Per la realizzazione del locale tecnico sono state prese le seguenti precauzioni:

- Le pareti del locale sono state costruite in materiale ignifugo a tenuta di gas e senza alcuna apertura da locali normalmente occupati dal pubblico ed aventi una classe di resistenza al fuoco di trenta minuti;
- È stata garantita una ventilazione adeguata considerando la fuoriuscita di gas dalla valvola di troppo pieno;
- Sono stati apposti all'ingresso del locale cartelli riferiti alle proprietà pericolose del gas.

Per evitare che all'interno dell'area si possano formare zone con carenza di ossigeno, dovute alle normali operazioni di riempimento o da anomalie di funzionamento del serbatoio, si sono convogliati gli scarichi delle valvole di sicurezza, dei dischi di rottura e dello sfiato in una condotta che porta all'esterno dell'area ad una altezza di circa tre metri dal piano di calpestio e con lo scarico a forma di collo d'oca, rivolto verso l'alto.

La pressione di scarico dovuta alle eventualità sopra citate è sufficiente a garantire la rapida dispersione della nube dei vapori di azoto lontano dall'area.

In accordo a quanto esposto precedentemente, i condotti di troppo pieno sono stati ruotati e direzionati verso l'esterno.

Tramite l'utilizzo di un rilevatore portatile è stato possibile verificare che l'apertura di tali valvole (normale prassi in fase di riempimento del serbatoio) non alteri la concentrazione di O₂ all'interno del vano tecnico.

Le precauzioni sopra descritte hanno permesso di ritenere assai improbabile la possibilità di ridurre il tenore di O₂ al disotto dei limiti di respirabilità ad altezza uomo.

Nella tabella sottostante (tab. 2) si riportano le distanze minime di sicurezza richieste al variare del diametro dello sfiato.

| Dimensioni sfiato (mm) | Separazione orizzontale richiesta (m) | | | Altezza verticale minima richiesta (m) | | |
|------------------------|---------------------------------------|--------------------|--------------------|--|--------------------|--------------------|
| | 19,5% O ₂ | 18% O ₂ | 17% O ₂ | 19,5% O ₂ | 18% O ₂ | 17% O ₂ |
| 25 | 3 | 1 | 1 | 4 | 4 | 4 |
| 50 | 5 | 2 | 2 | 4 | 4 | 4 |
| 80 | 6 | 3 | 3 | 4 | 4 | 4 |
| 100 | 9 | 4 | 3 | 4 | 4 | 4 |
| 150 | 12 | 6 | 5 | 4 | 4 | 4 |
| 200 | 17 | 8 | 6 | 4 | 4 | 4 |
| 250 | 21 | 10 | 7 | 4 | 4 | 4 |
| 300 | 24 | 11 | 8 | 4 | 4 | 4 |
| 400 | 33 | 15 | 11 | 5 | 4 | 4 |

Tabella 2. Posizione sicura degli sfiati di gas inerte per la concentrazione di O₂ (%vol) nel caso di sfiato orizzontale di azoto (10°C) [20, 21]

Nell'immagine sottostante (fig. 2) si riporta l'elaborazione grafica semplificata della nube di azoto indicando le percentuali di ossigeno al variare delle distanze orizzontali e verticali dal punto di rilascio, considerando il caso studio in esame con un diametro della valvola di sfogo di 25 mm ed una velocità di sfogo di 10 m/s [20] (la versione aggiornata del documento da cui sono tratti i valori, li ha conservati specificando che sono riferiti a sfiati ad alta pressione in quanto il modello utilizzato per la dispersione, PHAST, ha mostrato di sovrastimare la quantità di aria trascinata per basse velocità di rilascio [21])

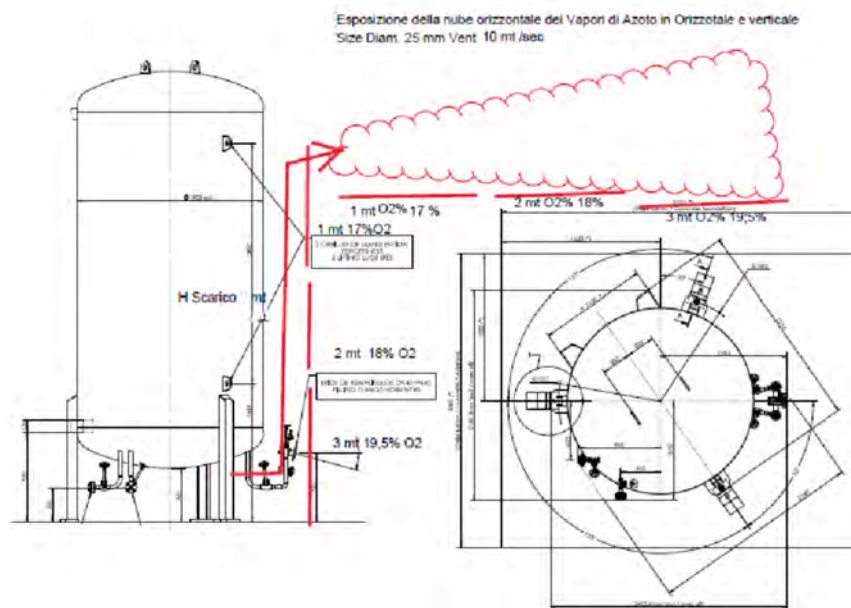


Figura 2. Elaborazione grafica della nube di azoto

In aggiunta alle accortezze atte a limitare il rischio di formazione di ambiente sotto ossigenato in prossimità del locale tecnico, sono stati posizionati, per ulteriore sicurezza, due sensori che monitorano in continuo la percentuale di O₂ dell'area. I sensori sono stati rispettivamente montati sia nella parte più interna del locale tecnico del recipiente criogenico sia dentro il capannone.

Qualora i pannelli che separano il vano locale tecnico dall'aria interna di lavoro dovessero perdere di tenuta, il sensore posto internamente è atto a rilevare una condizione di sotto ossigenazione.

Entrambi i sensori sono stati collegati a due segnalatori audio/visivi che avvisano gli utenti nel caso in cui vi sia in atto una condizione di preallarme (%O₂ in aria <18,5%).

3. Caso studio - Analisi di gestione di serbatoio di CO₂ liquida con temperatura di targa -40/+50 °C ai fini del non superamento dei limiti di temperatura fissati in costruzione

Durante la verifica di messa in servizio di un serbatoio costruito in accordo alla Direttiva 2014/68/UE con le seguenti caratteristiche: pressione di progetto 22 bar, temperatura di progetto -40/+50 °C, visti i dati rilevati sull'attrezzatura e considerato il comportamento dell'anidride carbonica si è dovuta adeguare la procedura per l'utilizzo dell'attrezzatura a pressione in sicurezza, al fine di evitare il superamento dei limiti di temperatura fissati dal costruttore. La procedura prende in esame vari casi: l'eccessivo prelievo; perdite da flange, tubazioni, valvole e dismissione del serbatoio con relativa diminuzione di pressione all'interno per lo svuotamento prima del trasporto.

Per utilizzare in sicurezza questi tipi di attrezzature a pressione si dovranno applicare sistemi tecnici quali: dispositivi di allarme di minima pressione correlati alla temperatura; valvole di blocco per un prelievo eccessivo per impedire che la pressione scenda al di sotto del valore limite di 9,8 bar e, di conseguenza, la temperatura scenda sotto - 40 °C.

Il sistema dovrà intervenire tempestivamente per interrompere il prelievo di anidride carbonica dal serbatoio, allertare un operatore che provveda alla regolazione dell'immissione e del prelievo di anidride carbonica.

3.1. Caratteristiche fisiche dell'anidride carbonica

L'anidride carbonica è un composto la cui formula molecolare è CO₂. La molecola di anidride non è infiammabile e dal punto di vista chimico è relativamente inerte.

Il peso specifico è pari a 1,5 volte quello dell'aria, quindi, tende a stratificare sul fondo degli ambienti chiusi e non ventilati.

L'anidride carbonica può essere liquefatta sottoponendola ad alte pressioni a temperatura inferiore ai 31 °C.

| | |
|-------------------------------------|---------------------|
| Temperatura | Pressione di vapore |
| 21,1 °C | 5,778 bar |
| 0 °C | 3,385 bar |
| -16,7 °C | 2,082 bar |
| -28,9 °C | 1,379 bar |
| -56,6 °C | 4,16 bar |
| -78,5 °C | 0 bar |
| Temperatura di sublimazione (1 bar) | -78,5°C |
| Temperatura critica | 31,1 °C |
| Pressione critica | 7,381 bar |
| Punto triplo | -46,6 °C a 5,18 bar |

Tabella 3. Costanti fisiche dell'anidride carbonica

La CO₂ può esistere simultaneamente come liquido, solido e gas ad una

temperatura pari a $-56,6^{\circ}\text{C}$ e una pressione di 4,16 bar, a cui corrisponde il suo punto triplo.

A temperature e pressioni inferiori a quelle del punto triplo, la CO_2 può esistere sia allo stato solido che gassoso in funzione delle condizioni fisiche in cui si trova.

La CO_2 è solida alla temperatura di $-78,5^{\circ}\text{C}$, alla pressione atmosferica sublima senza passare per la fase liquida e allo stato solido è comunemente chiamata "ghiaccio secco". Per pressioni inferiori a quella atmosferica, si hanno temperature di sublimazione più basse.

In sintesi, il comportamento fisico della CO_2 segue il diagramma di stato, per cui:

- a condizioni atmosferiche (1 bar e 20°C) si presenta allo stato gassoso;
- tra $-56,6$ e $+31,1^{\circ}\text{C}$ e pressioni maggiori di 5,2 bar si presenta allo stato liquido;
- a temperature inferiori ai $-56,6^{\circ}\text{C}$ si presenta allo stato solido.

3.2 Procedura per un corretto utilizzo del serbatoio

Il serbatoio in esame, avente una temperatura di progetto pari a $-40/ +50^{\circ}\text{C}$, sarà dotato di varie procedure di sicurezza per una gestione entro limiti fissati dal costruttore.

- Si deve tener conto della possibilità di prelievo eccessivo, perdite di prodotto da flange, guarnizioni, tubazioni, valvole e dell'eventualità di spostamento/disattivazione dell'attrezzatura (in quest'ultimo caso occorre realizzare lo svuotamento in sicurezza della stessa). Le procedure devono contenere almeno i seguenti punti:
- analisi dei rischi;
- metodologia di verifica dell'incremento di fragilità con la diminuzione della temperatura,
- sistema di ripressurizzazione;
- sistemi tecnici volti ad evitare le problematiche sopra esposte;
- formazione rivolta al personale addetto.

L'analisi dei rischi dovrà essere effettuata da un tecnico abilitato tenendo conto della tipologia dell'impianto, dell'attività svolta dall'utilizzatore, dei rischi connessi con il funzionamento dei sistemi di riscaldamento del fluido criogenico, dell'eventuale sorveglianza dell'impianto, dei rischi connessi con i sistemi di interruzione del fluido criogenico in caso di necessità e/o emergenza, delle grandezze critiche da controllare con particolare riferimento alle caratteristiche dei materiali impiegati e ai parametri di costruzione delle attrezzature, in coerenza alle circolari IspeSI e al D.L.gs. 81/08.

La metodologia di verifica dell'incremento di fragilità con la diminuzione delle temperature. deve identificare le operazioni per garantire i limiti di utilizzo, la verifica di resistenza all'infragilimento dell'attrezzatura a pressione secondo quanto previsto dalla norma UNI EN 1252-2 o utilizzando un metodo di calcolo equivalente. Per il sistema di ripressurizzazione occorre individuare il susseguirsi di operazioni da eseguirsi al fine di garantire la sicurezza del serbatoio affinché non avvenga il

fenomeno dell'infragilimento del materiale dovuto alle basse temperature raggiunte dalla CO₂.

Il serbatoio dovrà inoltre essere dotato di tutti gli accorgimenti tecnici volti ad evitare il verificarsi delle problematiche sopra esposte; detti accorgimenti potranno essere costituiti da un pressostato che blocchi il prelievo di anidride carbonica al di sotto dei 9,8 bar, corrispondenti ai -40 °C e di un sistema di allarme che avverta tempestivamente il personale formato, per il tempestivo intervento.

La formazione che è obbligatoria deve essere estesa a tutto il personale: da quello che utilizza l'attrezzatura, a quello che si occupa del rifornimento, la manutenzione e al personale che effettua la dismissione del serbatoio.

Per la verifica di messa in servizio del serbatoio criogenico è stato chiesto di inserire un blocco automatico che interrompa il prelievo alla pressione di 10 bar, e tutte le procedure per il riempimento e lo svuotamento del serbatoio.

4. Caso studio - Esame documentale di una dichiarazione di messa in servizio di un insieme criogenico non dotato di sonda LTP per il rischio di infragilimento a valle del vaporizzatore

Durante un esame documentale di un serbatoio criogenico di O₂ liquido ai fini della dichiarazione di messa in servizio da parte di INAIL di un insieme costruito secondo la PED con Modulo H1 in IV categoria; malgrado

- la completezza formale della dichiarazione di messa in servizio al d.m. 329/04 di tutta la documentazione prevista dall'art.6:
 - lettera a) elenco delle singole attrezzature, con i rispettivi valori di pressione, temperatura, capacità e fluido di esercizio;
 - lettera b) una relazione tecnica, con lo schema dell'impianto, recante le condizioni d'installazione e di esercizio, le misure di sicurezza, protezione e controllo adottate;
 - lettera c), una espressa dichiarazione da parte dell'utilizzatore e della fornitrice del fluido criogenico, redatta ai sensi dell'art. 2 del d.p.r.403/98 attestante che l'installazione era stata eseguita in conformità a quanto indicato nel manuale uso e manutenzione rilasciato dal fabbricante;
 - comma 4) una espressa dichiarazione da parte dell'utilizzatore e della fornitrice del fluido criogenico, redatta ai sensi dell'art. 2 del d.p.r.403/98 attestante che l'insieme era stato debitamente installato, mantenuto in efficienza ed utilizzato conformemente alla loro destinazione, non pregiudicando la salute, la sicurezza delle persone o degli animali domestici o la sicurezza dei beni;
- la rispondenza all'art. 5 lettera d) gli insiemi per i quali da parte del competente organismo notificato o di un ispettorato degli utilizzatori risultano effettuate per quanto di propria competenza le verifiche di accessori di sicurezza o dei dispositivi di controllo;

la dichiarazione di messa in servizio non poteva essere accettata perché, nella dichiarazione di conformità rilasciata dal fabbricante, nel certificato di conformità e di conseguenza nel verbale di accertamento degli accessori di sicurezza rilasciato dal competente organismo notificato, non era presente (seppur esistente nel P&I e indicato nella relazione tecnica) la sonda LPT (dispositivo di blocco del fluido per bassa temperatura).

In mancanza della verifica dell'efficienza della sonda LPT da parte del competente organismo notificato ed appurato che, dalla documentazione prodotta non risultava che a valle del vaporizzatore ad aria utilizzato per la vaporizzazione della fase liquida, fossero utilizzati materiali resilienti, la dichiarazione di messa in servizio è stata trattata come una dichiarazione di messa in servizio con l'effettuazione della verifica di messa in servizio ai sensi dell'art. 4 e 6 del d.m. 329/04, da parte della unità operativa territoriale INAIL competente per territorio. La verifica di messa in servizio è stata svolta presso la ditta utente dove il serbatoio criogenico era installato, durante la quale sono state svolte le operazioni di riconoscimento dell'insieme dai dati di targa e dalle punzonature di collaudo, effettuando successivamente tutte le verifiche di corretta installazione e di efficienza di tutti i dispositivi di sicurezza e controllo con esito positivo. Al termine della verifica è stato emesso verbale di verifica di primo impianto ai sensi dell'art. 1 comma 2 lettera a) del d.m. 329/04.

5. Considerazioni conclusive

In definitiva i casi studio esaminati confermano come l'esperienza operativa, purtroppo a volte con conseguenze gravi, abbia contribuito al miglioramento dei livelli di sicurezza e abbia costituito uno stimolo importante per l'evoluzione tecnica di questo tipo di serbatoi, sia ai fini della fabbricazione, sia per l'esercizio degli stessi, senza dimenticare il ruolo che in tale miglioramento ha svolto e tuttora svolge il presidio della messa in servizio di tali serbatoi nell'ambito del d.m. 329/04 e non solo.

Bibliografia

- [1] UNI EN 13458-1: 2003 Recipienti criogenici - Recipienti fissi isolati sottovuoto - Requisiti fondamentali
- [2] UNI EN ISO 21028-1:2016 Recipienti criogenici - Requisiti di tenacità per i materiali a temperatura criogenica - Parte 1: Temperature minori di -80 °C
- [3] UNI EN ISO 21028-2: 2018 Recipienti criogenici - Requisiti di tenacità per materiali a temperatura criogenica - Parte 2: Temperature comprese tra -80 °C e -20 °C
- [4] UNI EN 1629: 2009 Recipienti criogenici - Valvole per il servizio criogenico
- [5] UNI EN 1797: 2013 Recipienti criogenici - Compatibilità tra gas e materiali

- [6] UNI EN 13458-2: 2004 Recipienti criogenici - Recipienti fissi isolati sottovuoto - Parte 2: Progettazione, fabbricazione, controlli e prove
- [7] UNI EN 21009-2:2016 "Recipienti criogenici - Recipienti fissi isolati sottovuoto - Parte 2: Requisiti di funzionamento"
- [8] UNI EN 13371:2003 Recipienti criogenici - Accoppiamenti per il servizio criogenico
- [9] UNI EN 13648-1:2009 Recipienti criogenici - Dispositivi di sicurezza per la protezione contro la sovrappressione - Parte 1: Valvole di sicurezza per il servizio criogenico
- [10] UNI EN 13648-2:2004 Recipienti criogenici - Dispositivi di sicurezza per la protezione contro la sovrappressione - Dischi di rottura per il servizio criogenico
- [11] UNI EN ISO 21013-3:2016 Recipienti criogenici - Componenti per il rilascio della pressione per servizio criogenico - Parte 3: Dimensionamento e determinazione della portata
- [12] UNI/TS 11325-6:2014 Attrezzature a pressione - Messa in servizio ed utilizzazione delle attrezzature e degli insiemi a pressione - Parte 6: Messa in servizio delle attrezzature e degli insiemi a pressione
- [13] UNI 11325-12:2018 Attrezzature a pressione - Messa in servizio ed utilizzazione delle attrezzature e degli insiemi a pressione - Parte 12: Verifiche periodiche delle attrezzature e degli insiemi a pressione
- [14] Gazzetta ufficiale dell'Unione europea del 29.6.2022. Comunicazione della Commissione. La guida blu all'attuazione della normativa UE sui prodotti 2022 (2022/C 247/01)
- [15] Mazzocchi V., La sicurezza negli impianti criogenici. Tecnica e normativa. Atti del Convegno Nuove rotte per la sicurezza, la scienza e la tecnica rendono sicuro il lavoro, Genova, 29 ottobre 2009
- [16] European Commission's Working Group "Pressure" (WGP). Guidelines related to the Pressure Equipment Directive 2014/68/EU (PED) v. 6.0 (Document date: 06/01/2019 - Created by GROW.DDG1.C.4 - Publication date: n/a - Last update: 11/06/2020)
- [17] Forum italiano degli organismi notificati FION PED/SPV Parere condiviso n. 327 approvato il 2 aprile 2020
- [18] Cassazione Penale, Sez. 4, 30 agosto 2018, n. 39283 - Scoppio nella fabbrica di vernici e morte di quattro operai. Valutazione dei rischi e obbligo di periodico aggiornamento del DVR
- [19] Circolare ISPESL n.9 del 19 luglio 2004 "Impianti che utilizzano gas ottenuti dalla gasificazione dei corrispondenti fluidi criogenici"
- [20] EIGA European Industrial Gas Association Document 154/09 "Safe location of oxygen and inert gas vents", 2009

[21] ELGA European Industrial Gas Association Document 154/16 "Safe location of oxygen and inert gas vents", 2016

[22] DM 329/04 del 01.12.2004 "Regolamento recante norme per la messa in servizio d'utilizzazione delle attrezzature a pressione e degli insiemi a pressione di cui all'art.19 del d.lgs. 25.02.2000 n. 93.

Nuovo approccio all'operatività degli organismi di valutazione della conformità alla PED alla luce dell'evoluzione delle modalità di accreditamento per scopi di notifica

F. Giacobbe¹, E. Bemporad²

¹Inail Uot di Messina

²Inail Dit, Organismo Notificato per le direttive di prodotto, Roma

Abstract

La valutazione della conformità è l'attività svolta per dimostrare che un prodotto/processo/servizio o una persona o un sistema è conforme o soddisfa i requisiti specificati. I metodi per dimostrare la conformità includono certificazioni, prove e ispezioni. Gli organismi che svolgono attività di certificazione e/o ispezione sono indicati come Organismi di Valutazione della Conformità.

Un Organismo di Certificazione e/o Ispezione deve definire, documentare, attuare e mantenere attivo un sistema di gestione capace di supportare e dimostrare il costante rispetto dei requisiti previsti dalla normativa di riferimento. Ai sensi del recente documento internazionale EA 2-17:2020 e delle relative circolari, informative e tecniche, dell'organismo nazionale di accreditamento, Accredia, per poter operare quale Organismo Notificato (ON) per la direttiva 2014/68/UE o PED è necessario implementare, diversamente da quanto previsto precedentemente, non solo i requisiti definiti nella norma EN 17065, ma, in riferimento ad alcuni moduli e alle giunzioni permanenti anche i requisiti di cui alle norme EN 17020, EN 17021-1 e EN 17024.

La presente memoria, dopo una sintetica analisi degli scostamenti tra lo scopo di accreditamento nuovo e quello precedente, si propone di fornire un utile riferimento operativo per implementare in forma integrata i requisiti previsti dalle norme della serie EN 17000, attraverso un approccio sinergico che integra, ottimizzandoli, tutti i fattori comuni.

Saranno forniti esempi di integrazione in riferimento all'imparzialità, alla riservatezza, alla gestione dei reclami e ricorsi, alla competenza e formazione del personale, nonché sugli elementi tipici gestionali del sistema qualità, dimostrando come la strategia proposta rafforzi l'efficienza e l'autorevolezza dell'operato degli Organismi.

Keywords: valutazione della conformità, sistema di gestione, norme serie EN 17000, direttiva PED, Sistema Qualità.

1. Introduzione

Un Organismo di Valutazione della Conformità (OdV) è definito sia dal regolamento (CE) n.765/2008 sulla commercializzazione dei prodotti che dalla direttiva PED come un organismo che svolge attività di valutazione della conformità cioè, nel caso della PED, il processo atto a dimostrare il rispetto dei requisiti essenziali di sicurezza della direttiva relativi alle attrezzature a pressione o agli insiemi, e quale esempio di tale attività entrambe le fonti normative citano tarature, prove, certificazioni e ispezioni. I livelli degli obiettivi di tutela del pubblico, le caratteristiche fondamentali di sicurezza, gli obblighi e i requisiti degli operatori economici ed il livello di competenza degli organismi terzi di valutazione della conformità che valutano i prodotti o i sistemi di gestione della qualità, nonché i meccanismi di controllo di tali organismi (notifica e accreditamento), le procedure di valutazione della conformità più adeguate da applicare (moduli che comprendono anche la dichiarazione di conformità del fabbricante) e gli opportuni meccanismi di vigilanza del mercato (interni ed esterni) per garantire che lo strumento legislativo nel suo insieme operi in maniera efficace e fluida, costituiscono elementi interconnessi, funzionanti insieme e complementari, formando una catena della qualità dell'UE. In questo caso il termine «qualità» è utilizzato per designare il livello di sicurezza e altri obiettivi di politica pubblica perseguiti dalla normativa di armonizzazione dell'UE e non va confuso con il significato del termine «qualità» in ambito commerciale, che consente di differenziare tra diversi livelli di qualità del prodotto [1].

Per fare in modo che tutti gli organismi di valutazione della conformità svolgano le proprie funzioni allo stesso livello e nelle stesse condizioni di concorrenza leale l'UE ha ritenuto che l'accreditamento trasparente, quale previsto dal sopracitato regolamento (CE) n. 765/2008, garantendo il necessario livello di fiducia nei certificati di conformità, costituisca lo strumento preferito per dimostrare la competenza tecnica degli OdV.

La politica per l'accreditamento degli OdV (anche indicati come CAB) da parte degli Organismi Nazionali di Accredimento (NAB) è definita in modo condiviso dall'European co-operation for Accreditation (EA), l'associazione dei NAB, all'interno del documento EA 2/17 [2] che rappresenta la base per la notifica da parte delle Autorità di notifica per diventare Organismi Notificati e per operare nell'ambito della legislazione della UE sull'armonizzazione e altra normativa correlata. Il documento identifica i requisiti che devono essere adottati dagli Organismi Nazionali di Accredimento durante la valutazione e l'accreditamento dei CAB che richiedono la notifica, divenendo così Organismi Notificati sul sistema informativo europeo NANDO (New Approach Notified and Designated Organisations), è un "Documento procedurale per i Membri" a carattere obbligatorio e deve essere applicato da parte di tutti gli Organismi Nazionali di Accredimento che valutano e accreditano i CAB ai fini della notifica, salvo nei casi in cui l'Autorità di notifica e/o regolamentare - a propria discrezione - ha ufficialmente stabilito e pubblicato diversi requisiti.

La versione del documento EA 2/17 aggiornata nel 2020 [2] con un miglioramento del cosiddetto "standard preferito o approccio 1+" introdotto già con la versione 2016 dello stesso documento, è entrata pienamente in vigore il 17 aprile 2023, dopo un periodo di transizione durato tre anni.

2. Nuovo approccio alla valutazione della conformità nell'ambito delle attrezzature a pressione

Il suddetto approccio dello standard preferito si riferisce alle norme della serie EN ISO/IEC 17000, armonizzate ai regolamenti (CE) n. 765/2008, alla decisione n. 768/2008/CE (commercializzazione dei prodotti) e al regolamento (CE) n.1221/2009 (sistema comunitario di ecogestione o EMAS). Alla stessa serie appartiene la norma che definisce i requisiti dei NAB che accreditano i CAB, la EN ISO/IEC 17011 (versione attuale 2017, recepita dall'UNI nel 2018). I contenuti e lo stato di aggiornamento delle norme in particolare indicate nel documento EA 2/17 [2] con l'indicazione dello schema di cui costituiscono il riferimento, sono schematizzati in tabella 1.

| Schema accredit. | Norma | Titolo | Versione in vigore |
|------------------|---------|---|--------------------------|
| ISP | 17020 | Valutazione della Conformità - Requisiti per il funzionamento di organismi che eseguono vari tipi di ispezione | 2012 |
| MS | 17021-1 | Valutazione della Conformità - Requisiti per organismi che forniscono audit e certificazione di sistemi di gestione | 2015 |
| PRS | 17024 | Valutazione della Conformità - Requisiti generali per gli organismi che eseguono la certificazione di persone | 2012 |
| L | 17025 | Requisiti generali per la competenza dei laboratori di prova e taratura | 2017 (EN), 2018 (UNI) |
| PRD | 17065 | Valutazione della Conformità - Requisiti per organismi che certificano prodotti, processi e servizi | 2012 |

Tabella 1. Norme della serie EN ISO/IEC 17000 di riferimento per accreditamento/notifica

Tale serie di norme fornisce un quadro omogeneo di requisiti generali, strutturali, per le risorse, di processo e di sistema.

Per un ON operativo in ambito Regolamentato per le attrezzature a pressione fisse (direttiva PED) e trasportabili (direttiva 2010/35/UE o TPED), prima del 17 aprile 2023, era sufficiente essere accreditato rispettivamente per lo schema PRD (PED) e

per lo schema ISP (TPED) mentre le altre norme della serie EN ISO/IEC 17000 citate in tabella 1, erano prese a riferimento per aspetti specifici.

L'analisi degli scostamenti fra lo scopo di Accreditamento in essere allora e quanto previsto dal documento EA 2/17 M:2020 ha evidenziato che, per essere operativi sull'intero spettro delle attività possibili su entrambe le direttive, per l'ambito T-PED non vi sono variazioni, in quanto è sufficiente l'accREDITAMENTO secondo lo schema ISP, mentre per l'ambito PED, dal 17 aprile 2023, per alcuni moduli e procedure la norma preferita è divenuta vincolante, secondo quanto schematizzato in tabella 2.

| Procedura di valutazione della conformità/Modulo PED | | Norma preferita | Schema obbligatorio |
|--|--|--------------------|---------------------|
| A2 | Controllo interno della produzione unito a controlli ufficiali delle attrezzature a pressione effettuati a intervalli casuali | EN/ISO/IEC 17020 | ISP |
| B | Esame di tipo UE (tipo di produzione e tipo di progetto) | EN/ISO/IEC 17065 | PRD |
| C2 | Conformità al tipo UE basata sul controllo interno della produzione unita a prove delle attrezzature a pressione sotto controllo ufficiale ad intervalli casuali | | |
| D | Conformità al tipo UE basata sulla garanzia della qualità del processo di produzione | | |
| D1 | Garanzia della qualità del processo di produzione | | |
| E | Conformità al tipo UE basata sulla garanzia della qualità delle attrezzature a pressione | | |
| E1 | Garanzia della qualità dell'ispezione e della prova delle attrezzature a pressione finite | | |
| F | Conformità al tipo UE basata sulla verifica delle attrezzature a pressione | | |
| G | Conformità basata sulla verifica dell'unità | | |
| H | Conformità basata sulla garanzia totale della qualità | EN/ISO/IEC 17021-1 | MS |
| H1 | Conformità basata sulla garanzia totale della qualità con controllo della progettazione | EN/ISO/IEC 17065 | PRD |
| All. I PED, punto 3.1.2 | Approvazione del personale che esegue giunzioni permanenti | EN/ISO/IEC 17024 | PRS |
| | Approvazione delle procedure di giunzione permanente | EN/ISO/IEC 17020 | ISP |

Tabella 2. Norma preferita / schema di accreditamento in funzione del modulo PED

Se ne conclude che per la PED occorrono praticamente quasi tutti gli schemi previsti per l'accREDITAMENTO a scopo di notifica. Il riferimento allo standard EN ISO/IEC

17025, è richiesto esplicitamente in aggiunta, ove siano necessarie prove, totalmente per i moduli A2 e C2 e parzialmente (specifici requisiti) per i moduli B, F e G. Tale riferimento, come in precedenza, può essere indiretto, ossia è possibile soddisfarlo assistendo a prove presso laboratori accreditati e tarando direttamente o richiedendo che la strumentazione utilizzata sia tarata presso laboratori accreditati (LAT) o con riferibilità LAT.

Al fine di ottenere l'accreditamento sui quattro schemi previsti, è ovviamente necessario che il proprio Sistema Qualità (SQ), sia pienamente adeguato alle prescrizioni delle corrispondenti norme della serie EN ISO/IEC 17000.

3. Sistema Qualità di un organismo attualmente notificato per le attrezzature a pressione

3.1. Generalità sul sistema

Tutte le norme in tabella 1 prevedono l'obbligo per l'organismo di definire, documentare, attuare e mantenere attivo un sistema di gestione capace di supportare e dimostrare il costante rispetto dei requisiti previsti dalla norma stessa (serie EN ISO/IEC 17000). In generale sono previste due opzioni con cui l'organismo può ottemperare a tale obbligo:

- A. Sistema generico i cui elementi minimi sono definiti dalla serie EN ISO/IEC 17000;
- B. Sistema conforme ai requisiti della ISO 9001, anche se non certificato secondo quest'ultima, con evidenza della capacità dell'organismo di supportare e dimostrare il soddisfacimento coerente dei requisiti della serie EN ISO/IEC 17000;

I requisiti di sistema definiti dalle norme in tabella 1 sono abbastanza omogenei, ma non perfettamente sovrapponibili, come del resto è comprensibile, considerando le specificità di ciascuno schema pur se con riferimento a principi comuni. Gli elementi di sistema richiesti o meno dalle norme in tabella 1, quindi con particolare riferimento all'opzione A, e ad eccezione della EN ISO/IEC 17025 per cui non è obbligatorio essere accreditati, sono schematizzati, a fini di confronto, in tabella 3 in cui si evidenziano eventuali aspetti specifici di una norma rispetto alle altre.

| Elemento del sistema | Punto della EN ISO/IEC della serie 17000 | | | |
|--|--|---|---|------------|
| | 17020:2012 | 17021-1:2015 | 17024:2012 | 17065:2012 |
| Documentazione generale | 8.2 | 10.2.2 (rimando ai requisiti della norma) | 10.2.2 (rimando ai requisiti della norma) | 8.2 |
| Tenuta sotto controllo dei documenti | 8.3 | 10.2.3 | 10.2.3 | 8.3 |
| Tenuta sotto controllo delle registrazioni | 8.4 | 10.2.4 | 10.2.4 | 8.4 |

| | | | | |
|----------------------|---|---|--------|--------|
| Riesame di direzione | 8.5 (non prevede in input reclami e ricorsi*) | 10.2.5 (prevede in input lo stato delle azioni per trattare i rischi) | 10.2.5 | 8.5 |
| Audit interni | 8.6 (richiede garanzia che i risultati degli audit siano documentati) | 10.2.6 | 10.2.6 | 8.6 |
| Azioni correttive | 8.7 | 10.2.7 | 10.2.7 | 10.2.7 |
| Azioni preventive | 8.8 | | 10.2.8 | 8.8 |
| Reclami e ricorsi | *7.5, 7.6 | | | |

Tabella 3. Elementi di sistema richiesti dalle norme di accreditamento a confronto con evidenziazione delle specificità

3.2. Implementazione del sistema ai fini dell'adeguamento

Partendo da un sistema di gestione già conforme alle EN ISO/IEC 17065 e 17020, il pieno adeguamento alle norme EN ISO/IEC 17021-1 e 17024 richiede una revisione rispetto alle diverse specificazioni previste dal documento EA 2/17 M:2020 in relazione ad alcune procedure di valutazione della conformità (moduli) con riferimento alle EN ISO/IEC 17020 e 17065. Inoltre, sono richieste azioni quali:

- Implementazione del Manuale Qualità
- Implementazione del Regolamento di certificazione/Regolamento Giunzioni Permanenti
- Aggiornamento delle procedure di certificazione e di qualifica di procedimenti e personale per le giunzioni permanenti.

Lo sforzo maggiore è rappresentato dalla necessità di integrare i requisiti previsti dalle quattro norme di riferimento con gli schemi di accreditamento oggi necessari. Come già evidenziato per gli elementi del sistema in tabella 3, anche gli altri requisiti generali, strutturali, per le risorse e di processo, sono abbastanza omogenei, ma non completamente sovrapponibili e dunque è necessario che siano trattati in forma integrata.

Di tale integrazione darà conto il documento principale del sistema, ovvero il Manuale Qualità.

3.3. Integrazione dei requisiti delle norme di accreditamento nel sistema

Come accennato nel paragrafo precedente, è necessario che i requisiti generali, strutturali, per le risorse di processo e di sistema del CAB siano integrati. Il modo migliore per realizzare tale integrazione è operare un confronto che evidenzi le peculiarità di ciascuna norma, in modo da strutturare il sistema in coerenza con tutti i requisiti da soddisfare, in primis quelli comuni, tenendo conto delle specificità

e poi quelli previsti anche da una sola delle norme in funzione dell'aspetto/finalità per cui questa si applica, attribuendo ad ogni requisito il giusto peso.

Il risultato di questo lavoro è sintetizzato, con riferimento ai macro-requisiti, in tabella 4.

La possibilità di integrare elementi delle procedure di valutazione della conformità dei prodotti in un sistema di gestione integrato, anche in settori dove tale valutazione non sia ancora mandatoria, è indicata come il valore aggiunto attuale e futuro per le imprese e tutta una serie di parti interessate [3]. Inoltre, si propone l'integrazione efficiente degli standard con lo scopo di migliorare il sistema di gestione e sorveglianza del mercato cinese [4], prendendo a riferimento il modello UE di normativa di prodotto, inclusa la valutazione della conformità e l'attuazione della sorveglianza e della gestione del mercato nell'intero processo.

4. Esempi di integrazione dei requisiti di sistema

Il processo di integrazione comporta una modifica nelle modalità di organizzazione e operatività dell'ON e, conseguentemente un miglioramento delle prassi certificative in riferimento ad imparzialità, riservatezza, gestione dei reclami e ricorsi, competenza e formazione del personale, nonché sugli elementi tipici gestionali del sistema qualità.

4.1. Imparzialità

Le attività di certificazione e ispezione devono essere eseguite con imparzialità. L'ON deve essere responsabile per garantire l'imparzialità delle proprie attività e non deve permettere che pressioni di tipo commerciale, finanziario o di altro genere compromettano l'imparzialità. Deve inoltre identificare e valutare con continuità i rischi per la propria imparzialità. Questo processo deve comprendere quei rischi che derivano dalle sue attività, dalle sue relazioni o dalle relazioni del suo personale. Se viene identificato un rischio per l'imparzialità, l'ON deve dimostrare di essere in grado di eliminare o minimizzare tale rischio. L'alta direzione dell'Organismo di Ispezione deve impegnarsi riguardo all'imparzialità.

4.2. Riservatezza

L'ON deve essere responsabile della gestione di tutte le informazioni ottenute o prodotte durante l'esecuzione delle attività di certificazione e ispezione. Deve inoltre indicare al cliente, in anticipo, le informazioni che intende rendere di dominio pubblico. Pertanto, in linea di principio le informazioni, acquisite tramite le documentazioni e/o le attività in sito, sono considerate informazioni proprietarie del Cliente e devono essere gestite come riservate ad eccezione di quelle che il cliente, per propria volontà, rende disponibili al pubblico.

4.3. Gestione dei reclami e dei ricorsi

I Clienti hanno la possibilità di fare reclamo in merito alle attività correlate all'operato di certificazione / ispezione erogato dall' ON. La presentazione dei reclami e dei ricorsi, il loro esame e le relative decisioni non devono dar luogo a qualsiasi azione di natura discriminatoria nei confronti di chi li ha presentati.

| requisiti | Punto della EN ISO/IEC della serie 17000 | 17020 2012 | 17021- 1 2015 | 17024 2012 | 17065 2012 |
|-----------|--|--|---------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------|
| Generali | Aspetti legali e contrattuali | In requisiti strutturali* 5.1 | 4.1 | 4.1 | 4.1 |
| | Responsabilità per la decisione relativa alla certificazione | | In requisiti strutturali* 5.1.3 | 4.2 | In requisiti di processo** 7.6 |
| | Gestione dell'imparzialità ed indipendenza | nell'ambito dei principi 4.1 | 5.2 | 4.3 | 4.2 |
| | Responsabilità ed aspetti economico finanziari | nell'ambito dei requisiti strutturali* 5.1.4 | 5.3 | 4.4 | 4.3 |
| | Condizioni non discriminatorie | Solo in riferimento a reclami e ricorsi*** | | | 4.4 |
| | Riservatezza | 4.2 | 4.6 | In documentazione e registrazione 7.3 | 4.5 |

| | | | | | |
|-------------|---|------|-----|-----|-----|
| Strutturali | Requisiti amministrativi | *5.1 | | | |
| | Organizzazione e direzione | 5.2 | 6.1 | 5.1 | 5.1 |
| | Controllo operativo | | 6.2 | | |
| | Meccanismo di salvaguardia dell'imparzialità | | | | 5.2 |
| | Struttura dell'organismo di certificazione per la formazione- addestramento | | | 5.2 | |

| | | | | | |
|---------|--|-----|-----|-----|-----|
| Risorse | (Competenza del/Requisiti generali per il) Personale (dell'organismo) | 6.1 | 7.1 | 6.1 | 6.1 |
| | Personale coinvolto nelle attività di certificazione/ Risorse per la valutazione | | 7.2 | 6.2 | 6.2 |

| | | | | | |
|--|---|-----|-----|-----|--|
| | Impiego di singoli auditor ed esperti tecnici esterni | | 7.3 | | |
| | Registrazioni del personale | | 7.4 | | |
| | Subappalto/Affidamento all'esterno | 6.3 | 7.5 | 6.3 | |
| | Dispositivi ed apparecchiature/Altre risorse | 6.2 | | 6.4 | |

| | | | | | |
|------------------------------------|--|--------|---------------------|--------------------|-------|
| di processo | Generalità | | | | 7.1 |
| | Attività di pre-certificazione | | 9.1 | | |
| | Domanda (di certificazione)/ richiesta | | 9.1.1 | 9.1 | 7.2 |
| | Riesame della domanda | | 9.1.2 | | 7.3 |
| | Pianificazione degli audit | | 9.2 | | |
| | Metodi e procedure di ispezione | 7.1 | | | |
| | Trattamento degli elementi da sottoporre ad ispezione e dei campioni | 7.2 | | | |
| | Certificazione iniziale | | 9.3 | | |
| | Conduzione degli audit | | 9.4 | | |
| | Valutazione | | | 9.2 | 7.4 |
| | Riesame/esame | | | 9.3 | 7.5 |
| | Decisione relativa alla certificazione | | 9.5 | 9.4 | **7.6 |
| | Registrazione delle ispezioni | 7.3 | | | |
| | Rapporti e certificati di ispezione | 7.4 | | | |
| | Documentazione di certificazione | | | | 7.7 |
| | Elenco dei prodotti certificati | | | | 7.8 |
| | Mantenimento/rinnovo della certificazione | | 9.6 (rinnovo 9.6.3) | 9.6 (solo rinnovo) | |
| | Sorveglianza | | | | 7.9 |
| | Modifiche che influenzano la certificazione | | | | 7.10 |
| | Rescissione, riduzione, sospensione o revoca della certificazione | | | 9.5 | 7.11 |
| | Registrazione | | | | 7.12 |
| | Utilizzo di certificati, loghi e marchi | | | 9.7 | |
| | Reclami | 7.5*** | 4.7, 9.7*** | 9.8*** | 7.13 |
| Ricorsi | 9.8*** | | | | |
| Processi dei reclami e dei ricorsi | 7.6 | | | | |
| Registrazioni relative ai clienti | | 9.9 | | | |

Tabella 4. Requisiti richiesti dalle norme di accreditamento a confronto, con evidenziazione delle specificità

4.4. Competenza e formazione del personale

In generale, i processi della valutazione della conformità richiedono per il personale coinvolto specifiche e puntuali competenze in merito:

- alla corretta determinazione delle caratteristiche prestazionali e dimensionali d'interesse e dei relativi valori (es. limiti, tolleranze, condizioni, ecc);
- alla conoscenza dei requisiti previsti dalle norme tecniche applicabili;

- ai criteri per la selezione dei metodi specifici più adatti per condurre le attività (es. metodi di prova specifici, piani di campionamento, procedure di audit, ecc.);
- alla valutazione dei risultati e all'espressione del giudizio di accettabilità/non accettabilità.

4.5. Altri elementi del sistema

Oltre ad ampliare i riferimenti normativi e regolamentari della documentazione di sistema citata al paragrafo 3.2, è necessario che siano previste alcune disposizioni e/o modifiche specifiche, per i moduli A2 e H, che impattano sull'operatività dell'ON. Ad esempio, per i moduli A2 vari organismi hanno posto vincoli di durata/obblighi di rinnovo periodico nel caso di prodotti in serie, vincoli non più coerenti con la nuova connotazione del certificato come rapporto di ispezione.

Per i moduli H è necessario prevedere verifiche con o senza breve preavviso per indagare su reclami, oltre che in risposta a modifiche o come azione conseguente nei confronti di clienti cui è stata sospesa la certificazione. Inoltre, diviene strettamente cogente il vincolo di non superare i dodici mesi come frequenza delle verifiche di sorveglianza successive alla prima.

Per quanto riguarda invece le giunzioni permanenti ed in particolare la certificazione del personale, occorre prevedere che la domanda possa essere presentata dal candidato direttamente e non solo per il tramite del fabbricante suo datore di lavoro ed è comunque necessario che sia il candidato stesso a sottoscrivere singolarmente il regolamento. Diventano inoltre imprescindibili le dichiarazioni in forma tracciabile dei tecnici esaminatori dell'ON di non essere stati coinvolti in attività di formazione dei candidati o eventuali altre situazioni di potenziale conflitto di interesse, inoltre il candidato dovrà trasmettere la propria dichiarazione di assenza di conflitto d'interesse nei confronti del tecnico esaminatore. L'organizzazione cui appartiene il candidato è tenuta a garantire, oltre alla sicurezza dei tecnici esaminatori, idonee condizioni ambientali (es. illuminazione sufficiente, aereazione adeguata, assenza di pioggia e flussi di aria convogliata, ecc), ai fini della corretta esecuzione del procedimento di saldatura dei provini.

5. Conclusioni

L'entrata in vigore del documento EA 2/17 [2] ha significativamente modificato il quadro di riferimento dell'accreditamento a fini di notifica per l'ambito della direttiva PED. In particolare, mentre prima per un ON era sufficiente la titolarità di un unico schema di accreditamento, quello di prodotto, attualmente, per poter operare sull'intero spettro delle attività possibili, ne occorrono altri tre, relativamente ad ispezione, sistema di gestione e personale.

Poiché gli schemi di accreditamento previsti sono tutti basati sugli standard della serie normativa EN ISO/IEC 17000 in questa memoria si è proposto un riferimento operativo per implementare in forma integrata i requisiti delle quattro norme della

serie, 17020, 17021-1, 17024 e 17065, ovvero un approccio sinergico che integra, ottimizzandoli, tutti i fattori comuni.

L'integrazione è stata strutturata in due fasi. La prima ha previsto un confronto analitico dei requisiti generali, strutturali, per le risorse, di processo e di sistema previsti dalle quattro norme. La seconda ha riguardato la comparazione dei requisiti comuni (quali ad esempio: imparzialità, riservatezza, gestione dei reclami e ricorsi, competenza e formazione del personale, ecc), evidenziando le eventuali peculiarità previste dalle singole norme.

Il lavoro svolto ha dimostrato come la strategia di adottare un sistema integrato rafforzi l'efficienza e l'autorevolezza dell'operato degli ON.

6. Bibliografia

[1] Commissione Europea. Comunicazione della Commissione. La guida blu all'attuazione della normativa UE sui prodotti 2022 (2022/C 247/01) Gazzetta ufficiale dell'Unione europea del 29.6.2022.

[2] EA European Accreditation, Document on Accreditation for Notification Purposes, EA 2/17 M:2020, 17th April 2020_rev04 (approvato il 14/04/2020)

[3] Mjakuskina S. and Lapina I. Product Conformity Assessment within the Integrated Management System: Manufacturing Compliance and Customer Safety, Proceedings of The 22nd World Multi-Conference on Systemics, Cybernetics and Informatics (WMSCI 2018), 19-24

[4] Che D., Niu N., Theories and Practices in Market Surveillance and Management: An Analysis of the Implementation Tools and Paths of EU Legislation for Goods Based on the New Legislative Framework, ACM International Conference Proceeding Series, July 2022 (12th International Conference on Information Communication and Management, ICICM 2022), 84 - 8813

[5] Predrag P., Dejana P., Implementation of new international standards for certification and inspection bodies, Journal of Applied Engineering Science, vol. 12 no. 3 (2014)

[6] Cherepnalkovska S., Borche I. Jakimovska Popovska V., Standards in function of quality of products, International Journal - Wood, Design & Technology, Vol. 6, No. 1, (2017)

Valutazione ingegneristica di alcuni aspetti del ciclo di vita degli impianti per il trasporto, lo stoccaggio e l'utilizzo di idrogeno

C. Puccini¹, L. Schoepflin¹, C. Ferri¹, S. Bonvicini², O. Borgia¹

¹ Saipex S.r.l.

² Alma Mater Studiorum, Università degli Studi di Bologna

Abstract

La domanda energetica mondiale è cresciuta significativamente negli ultimi decenni. Nel panorama mondiale la maggior parte dell'energia prodotta deriva da combustibili fossili, con conseguente generazione di grandi quantitativi di gas serra. Al fine di ridurre le emissioni di questi ultimi, sono da tempo in corso la ricerca di nuovi vettori energetici e lo sviluppo di processi per lo sfruttamento delle risorse energetiche rinnovabili. L'idrogeno, allo stato attuale, è considerato uno dei vettori energetici più promettenti, anche se le sue caratteristiche chimico-fisiche e di pericolosità richiedono valutazioni accorte per garantire l'idoneità del suo impiego in sostituzione del gas naturale. In questo contesto si inserisce il presente studio, che ha avuto un duplice obiettivo. Infatti, da una parte si è valutata la fattibilità tecnica ed economica della conversione di una condotta e degli impianti ad essa connessi, attualmente impiegati per il trasporto di gas naturale, al trasporto di idrogeno. Dall'altra si sono analizzati i principali metodi approvvigionamento e di stoccaggio dell'idrogeno in vista della sua alimentazione ad un turbogeneratore, effettuando anche in questo caso un'analisi tecnica ed economica e considerando anche la messa a punto di un adeguato piano manutentivo mediante l'analisi RBI - Risk Based Inspection.

Keywords: idrogeno, trasporto, stoccaggio.

1. Introduzione

La domanda energetica mondiale è cresciuta significativamente negli ultimi decenni; ad oggi, la maggior parte dell'energia prodotta deriva da combustibili fossili. Mentre l'energia derivante da risorse fossili è economicamente competitiva rispetto a quella proveniente da risorse rinnovabili, essa presenta degli svantaggi consistenti in termini di emissioni di gas serra. Una delle sfide attuali più ambiziose consiste nel ridurre le emissioni di tali gas, che contribuiscono al surriscaldamento globale. L'implementazione di processi per la produzione di energia da fonti rinnovabili e l'individuazione di nuovi vettori energetici per i settori difficilmente elettrificabili, come l'industria e i trasporti pesanti, costituiscono degli elementi chiave per il raggiungimento di tale obiettivo [1].

A questo proposito, l'idrogeno è considerato uno dei vettori energetici più promettenti. Il problema principale dell'utilizzo di questo gas risiede nelle sue proprietà chimico-fisiche e di pericolosità. Infatti, esso ha delle dimensioni molecolari piccole al punto da rendere complesso il suo contenimento; inoltre presenta un ampio campo di infiammabilità ed una bassa energia di ignizione. Un ulteriore problema associato all'idrogeno è rappresentato dalla sua bassa densità a condizioni ambiente, motivo per cui il suo trasporto e stoccaggio richiedono pressioni elevate o temperature particolarmente basse. Per tali motivi è richiesta una valutazione accurata degli aspetti di sicurezza connessi all'uso di questa sostanza, con una conseguente difficoltà ed una certa lentezza nello sviluppo di nuove tecnologie basate sull'idrogeno.

Relativamente alle tecnologie per il trasporto, occorre tenere presente che il trasferimento di fluidi tramite condotta è solitamente preso in considerazione per il trasporto di grandi quantitativi su lunghe distanze. Tuttavia, per costruire nuove condotte per il trasporto di idrogeno i costi di investimento sono elevati e i tempi di implementazione lunghi; pertanto, è necessario valutare la possibilità di convertire ad idrogenodotti le condotte attualmente in uso per il trasporto di gas naturale [2]. Per quanto riguarda invece le tecnologie per la produzione di idrogeno, in base ai metodi di produzione è possibile ottenere [3]:

- idrogeno grigio;
- idrogeno blu;
- idrogeno verde.

L'idrogeno grigio è prodotto da combustibili fossili, con emissione in atmosfera della CO₂ ottenuta come prodotto secondario; attualmente circa l'80% dell'idrogeno presente sul mercato è grigio, essendo prodotto tramite steam-reforming del metano [1]. L'idrogeno blu è anch'esso ottenuto tramite steam-reforming del gas naturale, ma la CO₂ viene poi catturata, utilizzata come reagente o inviata a stoccaggio permanente. Si parla, invece, di idrogeno verde quando l'idrogeno è ottenuto da risorse rinnovabili, ad esempio, tramite elettrolisi dell'acqua alimentata da energia rinnovabile, senza che vi siano emissioni dirette di CO₂ in atmosfera. Una delle principali sfide attuali consiste nel rendere economicamente conveniente la produzione di idrogeno verde rispetto alla produzione di idrogeno grigio e di idrogeno blu.

In questo contesto si inserisce il presente lavoro, che è costituito da due studi di fattibilità. La prima analisi, presentata nella sezione 2, riguarda la conversione ad idrogenodotto di una condotta che trasporta gas naturale; la seconda, descritta nella sezione 3, è relativa all'acquisto ed allo stoccaggio ovvero all'autoproduzione e allo stoccaggio di idrogeno ai fini della sua alimentazione ad un turbogeneratore. Conclude il lavoro la sezione 4, che riporta alcune considerazioni finali.

2. Studio della fattibilità della conversione ad idrogeno di una condotta per il trasporto di gas naturale

2.1 Descrizione della condotta

La condotta TAP (Trans Adriatic Pipeline) costituisce la parte terminale del corridoio europeo meridionale per il trasporto di gas naturale, che ha la funzione di portare in Europa gas estratto dal giacimento Shah Deniz II nel mar Caspio. Tramite la condotta SCP, che attraversa l'Azerbaijan e la Georgia, il gas è trasportato al confine orientale della Turchia, dove ha inizio il condotto TANAP (Trans Anatolian Pipeline). Quest'ultimo è connesso ad occidente alla condotta TAP, che ha inizio al confine tra Turchia e Grecia, attraversa il nord della Grecia, l'Albania e infine il Mare Adriatico, e si collega alla rete di distribuzione italiana in Puglia, per una lunghezza totale di 878 km.

Attualmente la condotta TAP trasporta $10 \cdot 10^9$ m³/anno di gas naturale, con possibilità di espansione fino a $20 \cdot 10^9$ m³/anno. Lungo la linea sono presenti 2 stazioni di compressione, costituite da 3 compressori ciascuna; le 2 stazioni sono situate, rispettivamente, in Grecia ed in Albania. Nel punto di collegamento della condotta alla rete di distribuzione italiana, invece, è presente una stazione di decompressione.

2.2 Aspetti normativi relativi alla progettazione delle condotte

Ai fini della progettazione delle tubazioni e delle condotte in pressione le norme di riferimento sono:

- la norma americana ASME B31.3 "Process Piping" [4];
- la norma americana ASME B31.8 "Gas Transmission and Distribution Piping Systems" [5];
- la norma europea EN 13480 "Metallic industrial piping" [6];
- la norma europea EN 1594 "Trasporto e distribuzione di gas - Condotte per pressione massima di esercizio maggiore di 16 bar - Requisiti funzionali" [7].

Entrambe le norme forniscono i requisiti per la progettazione di condotte in pressione con riferimento ai materiali, alle ispezioni e alle prove necessarie per la messa in servizio. Tuttavia, esse forniscono indicazioni differenti relativamente a:

- la determinazione dello spessore minimo della tubazione e degli elementi accessori;
- la scelta dei materiali metallici e non metallici;
- la progettazione dei supporti e delle valvole;
- la scelta dei materiali per le saldature.

Sia la norma americana che quella europea contengono requisiti di progettazione generici, validi per tutte le sostanze, senza tenere in considerazione il trasporto di fluidi particolari, come l'idrogeno.

Tuttavia, nel 2008 la società americana degli ingegneri meccanici (ASME) ha emanato la norma ASME B31.12 "Hydrogen Piping and Pipeline" [8], che guida la progettazione delle condotte per idrogeno, indicando un metodo per la

determinazione dello spessore minimo, i materiali compatibili con idrogeno, i criteri di scelta degli elementi standard e delle valvole degli idrogenodotti.

Ai fini dell'analisi del gasdotto da convertire, è stata dunque presa come riferimento la norma ASME B31.12, effettuandone il confronto con la norma europea EN 13480, che è effettivamente stata utilizzata per la progettazione della condotta. Nello specifico, sono stati valutati i seguenti aspetti:

1. la pressione operativa nel caso del trasporto di idrogeno;
2. la compatibilità con idrogeno degli elementi strutturali;
3. l'idoneità dei componenti elettro-strumentali ad operare in presenza di idrogeno.

Questi tre aspetti sono analizzati, rispettivamente, nelle sezioni 2.3, 2.4 e 2.5, mentre nella sezione 2.6 si stima l'investimento economico necessario per risolvere le non conformità emerse dall'analisi degli aspetti in elenco.

2.3 Determinazione della pressione operativa nel caso di trasporto di idrogeno

Considerando la portata annua di gas naturale che attraversa la condotta TAP ed il potere calorifico del gas naturale, che è pari a 40 MJ/Nm³, l'energia trasportata corrisponde a 121 GWh/anno. Per trasportare la stessa energia utilizzando come vettore energetico l'idrogeno, considerando che il suo potere calorifico è pari a 13 MJ/Nm³, è necessaria una portata di idrogeno pari a 3,08·10⁷ Sm³/anno, 3 volte superiore a quella di gas naturale. Tuttavia, la densità dell'idrogeno è di 8 volte inferiore a quella del metano, che costituisce il componente principale del gas naturale.

Nelle condotte la portata volumetrica è controllata dalla caduta di pressione lungo la linea, come mostrato dall'equazione 1 [2]:

$$Q = C \cdot D_{in}^{2.5} \cdot e \cdot \sqrt{\frac{(P_1^2 - P_2^2)}{d \cdot Z \cdot T \cdot L \cdot f}} \quad (1)$$

dove:

Q: portata volumetrica di gas [Nm³/h];

C: costante di proporzionalità [adimensionale];

D_{in}: diametro interno della tubazione [mm];

e: parametro di efficienza [adimensionale];

P₁: pressione del gas in ingresso [kPa];

P₂: pressione del gas in uscita [kPa];

d: densità del gas relativa all'aria [adimensionale];

Z: compressibilità del gas [adimensionale];

T: temperatura del gas [K];

L: lunghezza della condotta [km];

f: fattore di attrito [adimensionale].

In Tabella 1 vengono riportati i valori delle variabili e dei parametri dell'equazione 1 relativi alla condotta TAP. Nello specifico, l'equazione 1 è stata utilizzata per

ricavare, in funzione di tutte le altre variabili e dei parametri, la differenza tra i quadrati delle pressioni del gas in ingresso ed in uscita dalla condotta.

| Parametri e variabili | Gas naturale | Idrogeno | Unità di misura |
|-----------------------|----------------|----------------|---------------------------|
| Q | $1 \cdot 10^7$ | $3 \cdot 10^7$ | Sm^3/anno |
| C | 0,000129 | | / |
| D_{in} | 1000 | | Mm |
| E | 1 | | / |
| d | 0,52 | 0,06 | / |
| Z | 1 | | / |
| T | 293,15 | | K |
| L | 878 | | Km |
| F | 0,001 | | / |
| $(P_1^2 - P_2^2)$ | $7 \cdot 10^8$ | $7 \cdot 10^8$ | kPa^2 |

Tabella 1. Condizioni operative della condotta

Dalla tabella 1 emerge come la differenza tra i quadrati delle pressioni sia simile per il gas naturale e per l'idrogeno; infatti, nell'equazione 1 la differenza della portata volumetrica dei due gas è compensata dalla loro diversa densità. Ne segue dunque che non c'è un cambiamento delle condizioni di pressione lungo la condotta nel passaggio da gas naturale ad idrogeno.

Tuttavia, la necessità di trasportare una portata volumetrica di idrogeno 3 volte superiore a quella di gas naturale influenza sia la velocità del gas all'interno della condotta, sia la velocità di rotazione dei compressori centrifughi delle due stazioni di compressione, che dovrebbe incrementare di circa 1,74 volte, con insorgenza di problemi per le pale dei compressori attualmente utilizzati [2]. Pertanto, la conversione da gas naturale ad idrogeno implica la sostituzione dei compressori.

2.4 Analisi della compatibilità con idrogeno degli elementi strutturali

Ai fini di valutare la compatibilità degli elementi strutturali della condotta, se ne sono analizzate le seguenti caratteristiche:

1. materiali di costruzione;
2. spessori;
3. valvole;
4. saldature.

Mentre la valutazione della compatibilità dei materiali da costruzione è stata effettuata per l'intera condotta, includendo anche le stazioni di compressione e decompressione, la verifica degli spessori, delle valvole e delle saldature è stata effettuata per la sola stazione di decompressione. Ogni aspetto è considerato nel seguito in una sezione dedicata.

2.4.1 Analisi della compatibilità con idrogeno dei materiali di costruzione

Ai fini dell'analisi della compatibilità con idrogeno dei materiali, sono stati individuati i materiali attualmente utilizzati per le tubazioni, per gli accessori, per le valvole e per le guarnizioni della condotta. Per ogni materiale sono state poi individuate le condizioni operative ammissibili, in termini di temperatura e pressione e, sulla base di queste condizioni, è stato individuato il possibile meccanismo di danno indotto da idrogeno, costituito dall'infragilimento da idrogeno (HE-Hydrogen embrittlement) e / o dal cracking indotto da idrogeno (HIC-Hydrogen Induced Cracking).

In Tabella 2 vengono riportati i materiali metallici impiegati per la costruzione della condotta (CS: acciaio al carbonio; SS: acciaio inossidabile) ed in Tabella 3 i materiali utilizzati per le guarnizioni.

| Materiale | Tipologia di acciaio | T (°C) | P (bar) | Meccanismi di danno |
|--------------------|-----------------------------|---------------|----------------|----------------------------|
| P275NL1 | CS | $T \leq +120$ | $P \leq 147$ | HE, HIC |
| P275NL2-1.1104 | CS | $T \leq +120$ | $P \leq 147$ | HE, HIC |
| L290NE-1.0484 | CS | $T \leq +120$ | $P \leq 147$ | HE, HIC |
| L360ME-1.0578 | CS | $T \leq +120$ | $P \leq 147$ | HE, HIC |
| L360NE-1.0582 | CS | $T \leq +120$ | $P \leq 147$ | HE, HIC |
| P355NL2-1.1106 | CS | $T \leq +120$ | $P \leq 147$ | HE, HIC |
| P355NL2-1.1106 | CS | $T \leq +120$ | $P \leq 147$ | HE, HIC |
| X2CrNi18-9 | SS | $T \leq +120$ | $P \leq 147$ | HE |
| X6CrNiTi18-10 | SS | $T \leq +120$ | $P \leq 147$ | HE |
| ASTM A 105 | CS | $T \leq +120$ | $P \leq 147$ | HE |
| P285NH | CS | $T \leq +120$ | $P \leq 147$ | HE, HIC |
| P280 GH | CS | $T \leq +120$ | $P \leq 147$ | HE, HIC |
| P460QL1 | CS | $T \leq +120$ | $P \leq 147$ | HE, HIC |
| P355GH | CS | $T \leq +120$ | $P \leq 147$ | HE, HIC |
| P355QH | CS | $T \leq +120$ | $P \leq 147$ | HE, HIC |
| P420QH | CS | $T \leq +120$ | $P \leq 147$ | HE, HIC |
| ASTM A 182 F321 | SS | $T \leq +120$ | $P \leq 147$ | HE |
| ASTM A182 GR. F304 | SS | $T \leq +120$ | $P \leq 147$ | HE |
| ASTM A304/304L | SS | $T \leq +120$ | $P \leq 147$ | HE |
| A105 | CS | $T \leq +120$ | $P \leq 147$ | HE, HIC |
| A216 WCB | CS | $T \leq +120$ | $P \leq 147$ | HE, HIC |
| ASTM A 216 GR. WCB | CS | $T \leq +120$ | $P \leq 147$ | HE, HIC |
| ASTM A350 LF2 | CS | $T \leq +120$ | $P \leq 147$ | HE, HIC |
| A350 LF6-2 | CS | $T \leq +120$ | $P \leq 147$ | HE, HIC |
| A352 Gr.LCC | CS | $T \leq +120$ | $P \leq 147$ | HE, HIC |
| A351 CF8 | SS | $T \leq +120$ | $P \leq 147$ | HE |

Tabella 2. Danni da idrogeno sui materiali della condotta

| Dati | | | Risultati |
|--------------------------------|--------|---------------|---------------------|
| Materiale | T (°C) | Compatibilità | Meccanismi di danno |
| Materiali metallici | | | |
| X6CrNiTi18-10 | ≤ +120 | Sì | HE |
| AISI 316L | ≤ +120 | Sì | HE |
| Soft Iron | ≤ +120 | Sì | HE |
| AISI 304 | ≤ +120 | Sì | HE |
| Materiali non metallici | | | |
| Flex. Graphite | ≤ +120 | Sì | - |
| Cellulosic fiber | ≤ +120 | Sì | - |
| NBR, asbestos free | ≤ +120 | Sì | - |

Tabella 3. Danni da idrogeno e compatibilità dei materiali delle guarnizioni

Dalla Tabella 2 si deduce che tutti i materiali metallici utilizzati sono soggetti al meccanismo di infragilimento da idrogeno (HE), mentre solo alcuni di essi possono subire il cracking indotto da idrogeno (HIC).

Per quanto riguarda le guarnizioni, la Tabella 3 mostra che i materiali utilizzati sono tutti compatibili con idrogeno e che i materiali metallici sono tutti soggetti all'infragilimento da idrogeno. A tale riguardo occorre ricordare che le guarnizioni servono per garantire il contenimento del gas; poiché la molecola di idrogeno ha dimensioni molto minori rispetto alla molecola di metano, l'idrogeno tende maggiormente a trafilare attraverso le guarnizioni. Per questo motivo nelle condotte a idrogeno alle guarnizioni vengono preferite spesso altre tecnologie di tenuta. Tuttavia, la norma ASME B31.12 non vieta l'utilizzo di guarnizioni, purché i materiali siano idonei all'utilizzo con idrogeno; la stessa consiglia di prevedere in fase di manutenzione un adeguato piano di controlli per individuare eventuali perdite del sistema.

2.4.2 Valutazione degli spessori

Per la determinazione degli spessori delle tubazioni la norma ASME B31.12 suggerisce di impiegare la seguente equazione:

$$t = \frac{P \cdot D_{ext}}{2 \cdot (S \cdot E \cdot M_f + P \cdot Y)} \quad (2)$$

dove:

t : spessore [mm];

P : pressione di progetto [MPa];

D_{ext} : diametro esterno [mm];

S : stress massimo ammissibile [MPa];

E : fattore di qualità delle saldature [adimensionale];

M_f : fattore di prestazione del materiale associato all'utilizzo di idrogeno [adimensionale];

Y : coefficiente caratteristico del materiale, valido per $t < D/6$ [adimensionale].

L'applicazione dell'equazione 2 ha evidenziato che alcuni spessori, che sono verificati nel caso del trasporto di gas metano, non lo sono nel caso di idrogeno, ovvero nel caso di idrogeno risultano insufficienti. Ciò è imputabile principalmente a due fattori:

- la differenza nelle formule per la determinazione dello spessore proposte dalla norma europea EN 13480 e dalla norma americana ASME B31.3;
- il fattore di prestazione M_f del materiale associato all'utilizzo di idrogeno, che è pari a 0,4 nel caso di acciaio al carbonio e ad 1 nel caso di acciaio inossidabile.

2.4.3 Valutazioni degli accessori e delle valvole

Per quanto riguarda la scelta degli accessori (quali, ad esempio, flange, cappelli, riduttori, espansori), nella progettazione della condotta è stata utilizzata la norma EN 10253 [9], come suggerito dalla norma europea EN 13480.

Ai fini della conversione della condotta, è stato verificato che le dimensioni standard dei componenti in essere siano uguali alle dimensioni standard in accordo alla norma B16.11[10] e alla norma B16.9 [11], indicate dalla norma ASME B31.12. Dall'analisi è emerso che le dimensioni degli accessori standard e delle valvole valutate secondo le norme americane ed europee non presentano differenze.

Per quanto riguarda le valvole, è stato verificato il rating, cioè la massima pressione a cui una valvola può essere sottoposta (MAWP), sulla base delle indicazioni riportate nella norma B16.34. Si fa presente che la MAWP è funzione del materiale e dell'intervallo di temperatura in cui lavora la valvola. La verifica ha evidenziato che non tutte le valvole rispettano il rating; nello specifico, 60 valvole su 330 andrebbero sostituite.

2.4.4 Valutazione delle saldature

Le saldature rappresentano un punto critico delle condotte per il trasporto di idrogeno, in quanto presentano una durezza elevata e quindi sono particolarmente soggette all'infragilimento da idrogeno. Il ciclo termico necessario per effettuare la saldatura provoca l'indurimento del materiale metallico, a seguito della sua fusione e solidificazione, per via di un cambiamento nella sua microstruttura.

Nello specifico, è stata analizzata la compatibilità con idrogeno dei seguenti elementi:

- materiali di saldatura;
- trattamenti termici post-saldatura;
- durezza del materiale.

Per i materiali di saldatura compatibili con idrogeno, la norma ASME B31.12 rimanda alla norma ASME II, parte C. Poiché per le saldature sono stati utilizzati dei materiali indicati dalle norme europee, è stato verificato che gli stessi materiali

sono considerati idonei dalla norma ASME II, parte C. Dunque, i materiali utilizzati per le saldature sono compatibili con idrogeno.

Per quanto riguarda i trattamenti termici post saldatura, è stato verificato che questi rispettano i requisiti riportati nella norma ASME B31.12.

Infine, relativamente alla durezza del materiale, occorre far presente che la norma ASME B31.12 consiglia un valore massimo di durezza a seguito del trattamento termico pari a 235 HV. Poiché i test di durezza effettuati sulle saldature hanno evidenziato valori di durezza fino a 299 HV, è emerso che il 20% delle saldature non rispetta il requisito di durezza consigliato dalla norma americana.

2.5 Analisi della compatibilità con idrogeno della componentistica elettro-strumentale

La valutazione della compatibilità della componentistica elettro-strumentale ad operare in presenza di nubi di idrogeno è stata effettuata per la sola stazione di decompressione. A tale riguardo, la direttiva ATEX [12] fa rientrare il gas naturale nel gruppo IIA, mentre l'idrogeno appartiene al gruppo IIC / IIB+H2. Dall'analisi dei 935 componenti elettro-strumentali presenti nella stazione di decompressione, è emerso che tutti sono marcati IIC o IIB+H2 e quindi sono adatti all'utilizzo in presenza di idrogeno. Successivamente stata verificata la classificazione ATEX delle aree a rischio di esplosione per il gas naturale e la stessa classificazione è stata effettuata ex-novo per l'idrogeno. È emerso che tutti i componenti elettro-strumentali installati nelle zone dove si ha una variazione della classificazione della zona sono compatibili con la nuova zona, ad eccezione di 12 lampade, che devono essere sostituite.

2.6 Investimento per risolvere le non conformità

È stato stimato il costo di investimento necessario per mettere in pratica le correzioni necessarie per porre rimedio alle non conformità evidenziate nelle sezioni 2.3, 2.4 e 2.5.

In Tabella 4 viene riportata una stima grossolana dei costi unitari e globali degli elementi da sostituire.

| Elemento da adeguare | Costo unitario | Unità/metri | Costo totale € |
|---------------------------|-------------------|---------------------|-------------------------------|
| Compressori | 1.200.000 €/unità | 6 unità | 7.200.000 |
| Valvole stazione | 60.000 €/unità | 57 unità | 3.420.000 |
| Saldature stazione | 150 €/unità | 20% delle saldature | 1.050.000 |
| Spessori tubazioni | 300 €/m | 1.542 metri | 462.600 |
| Comp. elettro-strumentali | 1.000 €/unità | 12 unità | 12.000 |
| TOTALE | | | 12,1·10 ⁶ € (2022) |

Tabella 4. Stima dell'investimento per la risoluzione delle non conformità

L'investimento iniziale per la costruzione della condotta TAP è stato pari a $4,1 \cdot 10^9$ € (2016). Il costo di adeguamento, pur irrisorio rispetto al costo della condotta iniziale, è elevato in valore assoluto, tanto più perché è solo parziale, dal momento che alcune voci fanno riferimento alle non conformità della sola stazione di decompressione.

3. Fattibilità dell'acquisto ovvero della produzione e dello stoccaggio di idrogeno verde ai fini della sua alimentazione ad un turbogeneratore

Ad oggi l'idrogeno viene utilizzato principalmente in ambito industriale come reagente (ad esempio, nelle reazioni di idrogenazione), ma – al fine di ridurre le emissioni di CO₂ – si prevede che nei prossimi anni sia utilizzato sempre più come combustibile alimentato ai turbogeneratori per la produzione di energia elettrica. A tale proposito è stata studiata la fattibilità dell'acquisto ovvero della produzione e dello stoccaggio di idrogeno verde ai fini della sua alimentazione ad un turbogeneratore pilota, predisposto per condurre prove a scopo di ricerca. Le specifiche del turbogeneratore sono riportate in Tabella 5.

| | |
|-------------------------------------|------------------------|
| Portata di idrogeno | 0,45 kg/s |
| Consumo di idrogeno in una prova | 2500 kg |
| Pressione dell'idrogeno in ingresso | 45 bar |
| Temperatura min / temperatura max. | 0°C / T _{amb} |
| Durata di una prova | 1,5 h |
| N° prove annuali richieste | 220 |
| Durata della ricerca | 5 anni |

Tabella 5. Specifiche del turbogeneratore pilota

Per l'alimentazione di idrogeno verde al turbogeneratore sono state analizzate 3 differenti configurazioni:

- configurazione A: acquisto di idrogeno verde e stoccaggio in pressione;
- configurazione B: acquisto di idrogeno verde e stoccaggio criogenico;
- configurazione C: produzione di idrogeno verde tramite elettrolisi dell'acqua e stoccaggio in pressione.

Le tre configurazioni sono presentate in dettaglio, rispettivamente, nelle sezioni 3.1, 3.2 e 3.3, mentre nella sezione 3.4 ne è effettuata l'analisi comparativa.

3.1 Configurazione A

Nella configurazione A idrogeno verde allo stato gassoso alla pressione di 200 bar ed a temperatura ambiente è acquistato all'esterno, consegnato in loco tramite carro bombolaio, compresso a 300 bar e stoccato in bombole, per essere

decompresso prima della sua alimentazione al turbogeneratore. In Figura 1 viene riportato lo schema di processo della configurazione A.



Figura 1. Schema di processo della configurazione A

3.2 Configurazione B

Nella configurazione B idrogeno verde liquefatto criogenicamente a 36 barg e a -250°C viene acquistato all'esterno, consegnato in loco tramite carro bombolaio e stoccato alle stesse condizioni di temperatura e di pressione della fase di trasporto. Durante le prove, l'idrogeno liquido viene prelevato dallo stoccaggio da una pompa ed inviato ad un evaporatore, dal quale esce idrogeno gassoso a $+10^{\circ}\text{C}$, che viene alimentato al turbogeneratore. In Figura 2 viene riportato lo schema di processo della configurazione B.



Figura 2. Schema di processo della configurazione B

3.3 Configurazione C

La configurazione C prevede di autoprodurre idrogeno verde tramite elettrolisi dell'acqua alimentata da energia solare, stoccando poi l'idrogeno come gas in pressione a 300 barg ed a temperatura ambiente. L'autoproduzione dell'idrogeno potrebbe avvenire tramite tre soluzioni:

- soluzione C1: produzione di idrogeno in continuo, utilizzando energia elettrica prelevata dalla rete quando non è possibile sfruttare l'energia solare, con vendita all'esterno dell'idrogeno prodotto in eccesso;
- soluzione C2: produzione della sola quantità di idrogeno necessaria alle prove da eseguirsi sul turbogeneratore, con vendita all'esterno dell'energia elettrica prodotta in eccesso dai pannelli solari;
- soluzione C3: produzione di idrogeno sfruttando unicamente l'energia solare prodotta dai pannelli solari.

In Tabella 6 vengono riportate le specifiche delle soluzioni sopra descritte, che prevedono tutte lo stesso elettrolizzatore in grado di produrre una portata di idrogeno pari a 0.04 kg/s.

| Soluzione | Ore giornaliere di funzionamento dell'elettrolizzatore | N° di prove annuali effettuabili uguale al n° annuale delle prove richieste? |
|-----------|--|--|
| C1 | 24,0 | sì |
| C2 | 17,5 | sì |
| C3 | 11,0 | no |

Tabella 6. Configurazione C: specifiche delle soluzioni C1, C2 e C3

Il tempo di funzionamento necessario all'elettrolizzatore per produrre il quantitativo di idrogeno necessario per una prova (2500 kg) è pari a 17,5 ore. Considerando che, in condizioni di irraggiamento solare medio nella regione italiana in cui opererebbe l'impianto le ore giornaliere di sole sono circa 11,0 [13], è necessario acquistare dalla rete energia elettrica rinnovabile per garantire il funzionamento dell'elettrolizzatore nelle restanti ore, pari a 13,0 nel caso della soluzione C1 ed a 6,5 nel caso della soluzione C2. Sia la soluzione C1 che la soluzione C2 consentono di effettuare prove in numero pari alle prove richieste (220). Invece nella soluzione C3 l'elettrolizzatore funzionerebbe solo nelle 11,0 ore in cui c'è disponibilità di luce solare ed il numero di prove effettuabili sarebbe pari a 138, dunque inferiore al numero di prove richieste; per tale motivo la soluzione C3 non riesce a rispettare le specifiche iniziali ed è da scartarsi.

I valori di efficienza tipici di un impianto fotovoltaico, di un elettrolizzatore e del loro abbinamento sono riportati in Tabella 7.

| | Impianto fotovoltaico | Elettrolizzatore | Impianto fotovoltaico + elettrolizzatore |
|----------------|-----------------------|------------------|--|
| Efficienza (%) | 18 | 59 | 10 |

Tabella 7. Valori tipici dell'efficienza di un impianto fotovoltaico, di un elettrolizzatore e del loro abbinamento [14]

Considerando un valore medio di irraggiamento solare pari a 1,28 kW/m² nella zona in cui si prevede di realizzare l'impianto, e una potenza dell'elettrolizzatore pari a 8 MW, è possibile ricavare che l'area dei pannelli necessaria per produrre la portata di idrogeno fissata è pari a 3,12·10⁵ m².

Per valutare la configurazione migliore, è stata condotta un'analisi economica del costo della prova per le soluzioni C1 e C2, che consentono di realizzare il numero di prove annuali richiesto. È emerso che la soluzione C2 è quella che presenta i maggiori vantaggi, in quanto è quella che ha il costo della prova minore; dunque, è questa soluzione che è adottata per la configurazione C.

3.4 Analisi comparativa delle configurazioni A, B e C

Al fine di determinare quale, tra le configurazioni A, B e C, sia quella preferibile, si sono messi a confronto il costo di una prova e l'investimento iniziale (valutati tramite il metodo di Guthrie [15]) e la fattibilità tecnologica di ogni configurazione, come riportato nella Tabella 8.

| Criterio | | Configurazione | | |
|-------------------------|------------------------|-------------------|---------------------|---------------------------|
| | | A | B | C |
| Costo della prova | € (2022) / prova | 46623 | 34622 | 21020 |
| Investimento iniziale | € (2022) | $1,5 \cdot 10^7$ | $1,5 \cdot 10^6$ | $4,7 \cdot 10^7$ |
| Fattibilità tecnologica | Difficoltà costruttive | Elevate pressioni | Temperature estreme | Elevata area dei pannelli |
| | Maturità tecnologica | Adeguate | Scarsa | Scarsa |

Tabella 8. Analisi comparativa delle configurazioni A, B e C

La Tabella 8 mostra che la configurazione C presenta il costo della prova più basso, dovuto alla vendita dell'energia elettrica prodotta in eccesso; tuttavia l'investimento iniziale è il più alto di tutti e l'area dei pannelli solari è molto elevata. La configurazione B è caratterizzata dal minimo investimento iniziale; essa presenta tuttavia delle difficoltà di implementazione, dovuta all'installazione di serbatoi criogenici ed alla scarsa maturità tecnologica. Grazie al minore investimento iniziale rispetto alla configurazione C ed alla maggiore facilità di implementazione rispetto alla configurazione B, la configurazione A pare essere quella migliore.

3.5 Analisi di dettaglio della configurazione A

Per la configurazione A è stata fatta un'analisi di dettaglio di un impianto pilota in fase di studio. In particolare, è stata eseguita un'analisi di tipo HazOp al fine di identificare i pericoli che essa presenta ed una valutazione della fattibilità della messa a punto di un piano delle ispezioni secondo i criteri dell'analisi RBI – Risk Based Inspection. Per quanto concerne l'analisi RBI, tale tecnica consente di identificare la periodicità delle attività di ispezione e manutenzione a cui sono soggette le attrezzature in ragione delle loro condizioni operative. Gli standard normativi che descrivono in maniera dettagliata il metodo di analisi RBI sono:

- la norma API RP 581 "Risk-based Inspection Methodology" [16];
- la norma ASME PCC-3 "Inspection Planning Using Risk-Based Method" [17].

Tali norme propongono dei metodi per la determinazione della frequenza di guasto delle attrezzature e delle conseguenze generate dai guasti, così da determinare quantitativamente il rischio generato dalle sostanze pericolose che possono essere rilasciate accidentalmente negli impianti. La tecnica RBI è già ampiamente utilizzata nell'industria petrolchimica, ma allo stato attuale è applicata in modo limitato ad impianti con presenza di idrogeno [18]. In Tabella 9 vengono riportati i meccanismi di danno indotti da idrogeno considerati dalle norme che guidano l'analisi RBI.

| Norma | Meccanismo di danno | Ambiente |
|------------|------------------------------|-----------------------|
| API RP 581 | Cracking indotto da idrogeno | H ₂ S - HF |
| ASME PCC-3 | Infragilimento da idrogeno | H ₂ |
| | Cracking indotto da idrogeno | |

Tabella 9. Meccanismi di danno da idrogeno contemplati dalle norme per l'analisi RBI [18]

Come mostrato in Tabella 9, la norma API RP 581 considera che il cracking indotto da idrogeno in ambienti caratterizzati dalla presenza di acido fluoridrico e solfidrico, ma non in presenza di idrogeno puro; inoltre non menziona l'infragilimento da idrogeno. Invece la norma ASME PCC-3 considera l'infragilimento da idrogeno ed il cracking indotto da idrogeno nelle attrezzature contenenti idrogeno puro. La norma ASME PCC-3 sembrerebbe, quindi, la più adatta per condurre un'analisi di tipo RBI per la configurazione A. Questa norma, però, non fornisce una procedura quantitativa per la determinazione della frequenza di guasto delle attrezzature e per la valutazione delle conseguenze che derivano dai rilasci di idrogeno, rendendo in tal modo impossibile l'effettuazione di un'analisi RBI rigorosa e sistematica.

Dal momento che tramite la tecnica RBI non è possibile mettere a punto un piano di ispezioni, in alternativa è possibile applicare il metodo ad indici attualmente utilizzato in Italia per valutare la complessiva adeguatezza delle attività messe in atto dal gestore di uno stabilimento a rischio di incidente rilevante al fine di gestire in modo sicuro il processo di invecchiamento delle attrezzature e degli impianti critici [19]. Il metodo, che è semi-quantitativo, consiste nel calcolo di un indice compensato, che tiene conto di fattori acceleranti (penalità) e fattori frenanti (compensazioni). Sulla base del valore dell'indice compensato è possibile esprimere un giudizio sull'adeguatezza della gestione dell'invecchiamento. In particolare, se l'indice compensato è negativo, il piano delle ispezioni è inadeguato, quindi, è necessario introdurre misure compensative, ad esempio, un monitoraggio più frequente degli elementi critici mediante tecniche di controllo non distruttive.

4. Conclusioni

La presente ricerca ha avuto lo scopo da un lato, di valutare la possibilità di convertire la condotta TAP, progettata per il trasporto di gas naturale, ad

idrogenodotto; dall'altro di studiare la fattibilità di un processo per l'acquisto ovvero la produzione e lo stoccaggio di idrogeno verde ai fini della sua alimentazione ad un turbogeneratore pilota.

Dall'analisi della condotta è emerso che ad oggi non esistono normative a livello europeo specifiche per la progettazione di idrogenodotti e che la condotta TAP, progettata per il trasporto di gas naturale, non risulta completamente idonea per il trasporto di idrogeno. Infatti, sono emerse diverse non conformità riguardanti i compressori, gli spessori delle tubazioni, le valvole, le saldature e la componentistica elettro-strumentale installata nella stazione di decompressione. Pertanto, risultano elevati i costi necessari per l'adeguamento del gasdotto, al fine di renderlo idoneo al trasporto di idrogeno.

Relativamente al processo di produzione / acquisto e stoccaggio di idrogeno da alimentarsi al turbogeneratore pilota invece, è emerso che la produzione di idrogeno tramite elettrolisi alimentata da energia solare presenta dei limiti dal punto di vista della fattibilità tecnologica, dovuti alla scarsa efficienza del processo ed all'elevato investimento iniziale. Per tale motivo è preferibile acquistare idrogeno verde all'esterno e stoccarlo come gas in pressione. Per l'impianto che consente di implementare questo processo non è tuttavia possibile predisporre un piano ispettivo secondo i criteri dell'analisi RBI - Risk Based Inspection, perché ad oggi la norma che descrive in modo dettagliato la procedura quantitativa per effettuare l'analisi RBI non contempla attrezzature che lavorano con idrogeno puro e che sono dunque soggette all'infragilimento da idrogeno ed al cracking indotto da idrogeno. È, tuttavia, possibile stabilire, in modo semi-quantitativo, l'adeguatezza del piano di gestione delle attrezzature mediante l'impiego di un metodo a indici utilizzato in Italia per monitorare l'invecchiamento delle apparecchiature.

Bibliografia

[1] Abe, J. O., Popoola, A. P. I., Ajenifuja, E., & Popoola, O. M., 2019. Hydrogen energy, economy and storage: Review and recommendation. In *International Journal of Hydrogen Energy* (Vol. 44, Issue 29, pp. 15072–15086), <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.04.068>.

[2] Haeseldonckx, D., & D'haeseleer, W., 2007. The use of the natural-gas pipeline infrastructure for hydrogen transport in a changing market structure. *International Journal of Hydrogen Energy*, 32(10–11), 1381–1386, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2006.10.018>.

[3] Ilsole24ore, 2022, www.ilsole24ore.com, consultato nel novembre 2022

[4] ASME B31.3, 2018, *Process Piping*

[5] SME B31.8, 2022, *Gas Transmission and Distribution Piping System*

[6] EN 13480, 2017, *Metallic industrial piping*

- [7] EN 1594, 2013, Trasporto e distribuzione di gas – Condotte per pressione massima di esercizio Maggiore di 16 bar – Requisiti funzionali
- [8] ASME B31.12, 2019, Hydrogen Piping and Pipelines
- [9] EN 10253, 2007, *Butt-welding pipe fitting: Non alloy and ferritic alloy steels with specific inspection requirements*
- [10] ASME B16.11, 2016, Forged Fitting, Socket-Welding and Threaded
- [11] ASME B16.9, 2019, Factory – Made Wrought Buttwelding Fittings
- [12] Direttiva ATEX, 2014/34/UE
- [13] Pannellisolari.bologna,2022 www.Pannellisolari.bologna.it, consultato nel novembre2022
- [14] Grimm, A., de Jong, W. A., & Kramer, G. J., 2020. Renewable hydrogen production: A techno-economic comparison of photoelectrochemical cells and photovoltaic-electrolysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(43), 22545–22555, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.06.092>.
- [15] Guthrie K.M., 1969, Chemical Cost Estimating
- [16] API RP 581, 2016, Risk-based Inspection Methodology
- [17] ASME PCC 3, 2022, Inspection Planning Using Risk-Based Methods
- [18] Campari, A., Ustolin, F., Paltrinieri, N., Leva, M. C., Patelli, E., Podofillini, L., Wilson, S., Darabi, M. A., & Alvaro, A. Applicability of Risk-based Inspection Methodology to Hydrogen Technologies: A Preliminary Review of the Existing Standards Auditing OF and RKM View project Lo-Risk (Learning about Risk) View project Applicability of Risk-based Inspection Methodology to Hydrogen Technologies: A Preliminary Review of the Existing Standards, https://doi.org/10.3850/978-981-18-5183-4_R13-01-095-cd.
- [19] INAIL, 2021, Valutazione sintetica dell’adeguatezza del programma di gestione dell’invecchiamento delle attrezzature negli stabilimenti SEVESO – Linea guida, 2021

Gruppi frigo ad ammoniaca: evoluzione della tipologia e dei criteri di progettazione dei sistemi di sicurezza in caso di rilascio

V. Prete², G. Gorrino³, M. Bortelli¹, G. Clerici¹, E. Portigliatti¹

¹Società Sirio Srl

²Inail - Uot di Alessandria

³Inail - Uot di Roma

Abstract

L'evoluzione tecnologica dei gruppi frigo ad ammoniaca proposti negli ultimi anni è evidente, in particolare per i gruppi da posizionare all'esterno di edifici.

La vecchia tipologia di gruppi posti completamente all'aperto o sotto tettoia per la protezione dagli agenti atmosferici è ormai soppiantata dall'introduzione di gruppi frigo posti all'interno di cabinati, nei quali è inserito l'intero gruppo, costituito essenzialmente da compressore, condensatore ammoniaca ed evaporatore ammoniaca.

L'esperienza acquisita nello svolgimento di analisi degli incidenti per oltre 12 gruppi frigo negli ultimi 10 anni, totalmente nuovi o ricondizionati ed installati presso aziende a rischio di incidente rilevante, ha permesso di approfondire le principali tematiche legate alla pericolosità dell'ammoniaca presente in tali installazioni a fronte di una perdita di contenimento, identificata nei seguenti scenari:

- Rilascio di gas tossico nell'area circostante,
- Formazione di miscela infiammabile in spazio confinato, con innesco e sviluppo di un'esplosione.

Sono state confrontate le modalità di prevenzione dei rilasci, i diversi sistemi di contenimento di una perdita (rilevamento del gas, ventilazione, abbattimento dell'ammoniaca mediante erogazione di acqua), che portano ad una moltiplicazione degli scenari incidentali possibili; il confronto si è esteso anche alla gestione di un rilascio prolungato da gruppi frigo con elevata quantità di ammoniaca in ciclo.

Il confronto ha consentito l'identificazione di spunti per approfondimenti tecnici; l'evoluzione tecnologica dovrebbe pure applicarsi alla normativa specifica in merito ai sistemi di sicurezza, così da rimanere allineata allo stato dell'arte e facilitare le fasi di progettazione e fornitura, oltre che l'approvazione da parte degli Enti competenti.

Keywords: ammoniaca, gruppi frigoriferi, rilevatori NH₃.

1. Evoluzione nell'impiego e realizzazione di gruppi frigo ad ammoniaca

L'utilizzo di gruppi frigoriferi ad ammoniaca è sempre più esteso, stante le caratteristiche uniche dell'ammoniaca, sia per l'efficienza energetica (ottimale per fluidi

refrigeranti che operino fra -5 e -30 °C), sia per l'impatto ambientale (Global Warming Potential pari a zero), rispetto ad altri fluidi frigoriferi.

Le normative e gli standard di riferimento ai fini della sicurezza dei gruppi frigo ad ammoniaca sono:

- DM 10 Giugno 1980 [1] (Riconoscimento di efficacia di sistemi di sicurezza applicati agli impianti frigoriferi industriali ad ammoniaca).
- UNI EN 378 [2] (Sistemi di refrigerazione e pompe di calore - Requisiti di sicurezza e ambientali).

L'evoluzione tecnologica dei gruppi proposti negli ultimi anni è evidente, in particolare per i gruppi da posizionare all'esterno di edifici.

La vecchia tipologia di gruppi posti completamente all'aperto o sotto tettoia per la protezione dagli agenti atmosferici è ormai superata dall'introduzione di gruppi frigo posti all'interno di cabinati, nei quali è inserito l'intero gruppo, costituito essenzialmente da compressore, condensatore ammoniaca, evaporatore ammoniaca.

L'introduzione di un nuovo gruppo frigo richiede la presentazione della documentazione tecnica ai fini della valutazione del progetto di prevenzione incendi, presso il Comando provinciale VVF; per attività soggette a rischio di incidente rilevante (D. lgs. 105/15 [3]), risulta necessario anche presentare la relazione giustificativa del non aggravio di rischio.

A seguito della preparazione della documentazione tecnica e delle relazioni di non aggravio di rischio per numerosi progetti negli ultimi 10 anni, tutti a servizio di stabilimenti chimici, è stato possibile raccogliere e comparare le soluzioni adottate ai fini della prevenzione degli incidenti rilevanti, considerando i due potenziali scenari incidentali derivanti da una perdita di contenimento di ammoniaca:

- Rilascio di gas tossico nell'area circostante,
- Formazione di miscela infiammabile in spazio confinato, con innesco e sviluppo di un'esplosione.

2. Configurazione

I nuovi gruppi frigo esaminati sono contenuti in un cabinato, installati in esistenti edifici aperti su di un lato o in edifici completamente chiusi.

I cabinati sono classificabili come package installati tal quali dal fornitore; sono realizzati con materiali incombustibili (acciaio e pannelli sandwich in lana di roccia), con un'apertura da cui viene aspirata l'aria ambiente ed un'uscita dell'aria all'atmosfera, al di sopra del cabinato.

La scelta del cabinato facilita l'ubicazione in uno Stabilimento esistente, poiché richiede soltanto la realizzazione di una piazzola in cemento, in area adiacente all'utenza o nell'area dedicata ai servizi di Stabilimento, più i collegamenti ai servizi. Il gruppo potrà poi essere rilocato in futuro, a seguito di mutate esigenze di sviluppo dell'area. Bisogna anche considerare la forte riduzione dell'impatto sonoro garantita dal cabinato.

All'esterno del cabinato è presente il sistema di abbattimento degli scarichi dalle valvole di sicurezza, costituito da un serbatoio contenente acqua, dotato di diffusore dell'ammoniaca gassosa, per facilitare l'assorbimento.

La dimensione dei cabinati è variabile, stante le diverse taglie di potenza frigorigena; nei casi esaminati, la quantità di ammoniaca contenuta passa da 60 kg a 5,1 t di ammoniaca. In altri casi, i gruppi sono stati installati in edifici esistenti, aperti completamente su di un lato, realizzati in materiale incombustibile; all'interno del box può essere posto l'intero gruppo, oppure soltanto il/i compressore/i, con scambiatori lasciati all'aperto. Nel presente articolo non vengono esaminati i gruppi posizionati in edifici esistenti completamente al chiuso.

3. Prevenzione dei rilasci di ammoniaca

La realizzazione dei gruppi in cabinati ha comportato una minimizzazione dell'estensione delle linee di circolazione ammoniaca gassosa e liquida; il numero di accoppiamenti flangiati è stato ridotto consistentemente, soprattutto a contatto con l'ammonica liquida, garantendo connessioni saldate. Le pochissime flange residue sono del tipo ad elevata tenuta, con impiego di guarnizioni spirometalliche, guarnizioni incamerate, O-ring o comunque guarnizioni non soggette a blow-out.

Grazie alle soluzioni tecniche adottate, la stima della frequenza di accadimento di un rilascio di ammoniaca in fase gassosa o liquida ha portato a frequenze di accadimento ridotte ed anche a potenziali aree di efflusso molto ridotte.

In base all'esperienza storica delle installazioni considerate, a partire dal 2016, è stata riscontrata soltanto una perdita per formazione di una cricca sulla mandata di un compressore, probabilmente generata dalle vibrazioni, con area dell'ordine del mm².

4. Contenimento dei rilasci di ammoniaca

Per i gruppi ubicati in cabinati, il principale sistema di contenimento è garantito dal cabinato stesso, che confina il gas all'interno, mitigando la dispersione all'esterno e quindi l'esposizione di personale operativo dell'impianto. L'efficacia di tale soluzione è particolarmente evidente se si considera un rilascio in fase liquida che, in assenza di confinamento, è in grado di generare potenzialmente un getto bifasico ed una nube avente un'estensione dell'ordine del centinaio di metri relativamente alla soglia delle lesioni irreversibili (IDLH, pari a 300 ppm). Il cabinato trattiene il getto all'interno, così da consentire la vaporizzazione della fase liquida post evaporazione per flash; la fuoriuscita dell'ammoniaca avverrebbe più lentamente e progressivamente, sotto forma di gas ed a velocità più ridotta: ciò favorisce la dispersione in quota (l'ammoniaca ha un peso molecolare inferiore a 0,6 volte quello dell'aria).

Il confinamento all'interno comporta però l'eventuale sviluppo di un volume consistente nel campo di infiammabilità e, seppur poco probabile, l'innescò della miscela aria / ammoniaca.

Per i gruppi ubicati in box aperti su tre lati, si garantisce solo un parziale contenimento e quindi lo studio di dispersione di un rilascio di ammoniaca, soprattutto liquida, può portare a distanze di danno significative, seppur su direzioni/aree più limitate; il lato aperto consente comunque di ridurre il grado di confinamento e previene o limita l'estensione di un volume significativo nel campo di infiammabilità.

Per entrambe le tipologie (cabinato chiuso o box aperto su di un lato), hanno una particolare importanza i seguenti sistemi di sicurezza, per mitigare gli effetti di un rilascio tossico e prevenire lo sviluppo di un'esplosione:

1. Sistema di rilevamento ammoniacca;
2. Sistema di ventilazione (per i gruppi in cabinato);
3. Sistema di abbattimento (assorbimento con acqua).

1. Sistema di rilevamento ammoniacca

Per entrambe le tipologie di gruppi frigo considerate, sono stati installati sistemi di rilevamento ammoniacca, mediante rilevatori puntiformi, di facile reperibilità sul mercato e venduti da ditte specializzate con adeguata esperienza. Nei gruppi in cabinato, si riscontra la presenza di due rilevatori (per gruppi di piccola taglia) o di tre sensori (per gruppi di taglia elevata); le logiche di sicurezza adottate sono differenziate a seconda dei fornitori dei gruppi; in alcuni casi, l'analisi degli incidenti condotta mediante HazOp e studio degli eventi incidentali, ha portato a modifiche o affinamenti delle logiche preimpostate dal fornitore.

A titolo di esempio si citano i seguenti casi, relativi a tre fornitori e tre stabilimenti diversi, con anche hold-up di ammoniacca ben diversi (60 kg, 650 kg, 5100 kg):

- a) due rilevatori attivano il ventilatore di emergenza a 500 ppm e poi, a 900 ppm, comandano il blocco macchina;
- b) due rilevatori con soglia di intervento a 100 ppm (segnalazione di allarme in sala controllo, più allarme ottico / acustico in corrispondenza del gruppo frigo; inibizione dell'accesso di personale all'interno del cabinato) e a 300 ppm (segnalazione di allarme; sgancio alimentazione elettrica al cabinato e fermata del gruppo frigo; attivazione del ventilatore di emergenza e pompa di circolazione acqua per l'abbattimento ammoniacca);
- c) tre rilevatori con soglia di intervento a 50 ppm (per il sensore vicino all'ingresso del cabinato, con attivazione del ventilatore e segnalazione di allarme a monitor in sala controllo), 100 ppm (per i due sensori posti vicino al compressore, con attivazione del ventilatore, partenza pompa per l'invio dell'acqua allo scrubber e segnale in sala controllo), 1000 ppm (si toglie l'alimentazione elettrica a tutto il package con conseguente fermata del gruppo frigo, escluso sistema di estrazione aria ed abbattimento di emergenza).

In tutti e tre gli esempi si identificano soglie di intervento nettamente inferiori al limite inferiore di infiammabilità dell'ammoniaca (LFL) pari a 15.400 ppm, oltre che superiori al TWA (25 ppm) ed allo STEL (35 ppm), considerando gruppi in cabinato senza la presenza costante del personale.

Risulta chiara la variazione nella complessità della logica di sicurezza all'aumentare dell'hold-up, che richiede un'adeguata verifica durante lo svolgimento dell'analisi di rischio e che comporta anche, talvolta, un'interlocuzione non facile con il fornitore,

soprattutto per i gruppi di piccola taglia, stante l'approccio mirato a non accettare variazioni al pacchetto proposto.

Per i gruppi ubicati in box parzialmente aperti, il numero di sensori proposti è più elevato, poiché l'area da coprire è più estesa, soprattutto nel caso di condensatori/evaporatori ammoniaci ubicati all'esterno. La progettazione del sistema di rilevamento non è più di competenza del fornitore del gruppo frigo, ma diventa di responsabilità del Gestore dello Stabilimento; risulta necessario:

- identificare la posizione dei potenziali punti di rilascio;
- valutare se il rilascio è di ammoniaca gassosa calda o di ammoniaca liquida, che potrebbe anche essere a bassa temperatura;
- considerare logiche di sicurezza differenziate, a seconda del pericolo da fronteggiare.

A titolo di esempio, la configurazione più complessa esaminata e relativa ad un intervento di sostituzione e potenziamento di un gruppo frigo esistente, prevedeva:

- cinque compressori di ammoniaca ubicati in box aperto su di un lato;
- due distinti gruppi di condensazione/vaporizzazione ubicati all'esterno del box, sviluppati su più piani.

È stato quindi necessario prevedere:

- 10 rilevatori di ammoniaca a protezione dell'area dei compressori, con soglia di allarme sarà pari al 15% del limite inferiore di infiammabilità dell'ammoniaca (22.500 ppm) e soglia di blocco (fermata dei compressori) pari al 30% del limite inferiore di infiammabilità dell'ammoniaca (45.000 ppm);
- 10 rilevatori di ammoniaca a protezione dell'area degli scambiatori e tubazioni con presenza di ammoniaca, aventi soglia di intervento a 50 ppm (preallarme), 100 ppm (allarme in sala controllo), 300 ppm (attivazione barriera d'acqua, in logica "2 su n").

Come risulta evidente, il pericolo da fronteggiare (formazione miscela infiammabile in zona semi-confinata, oppure rilascio di ammoniaca liquida in ambiente aperto) ha comportato soluzioni diverse tra loro; i sensori stessi sono, tra l'altro, di tipo differente tra le due aree, avendo campi scala che variano di ordini di grandezza.

2. Sistema di ventilazione (per i gruppi in cabinato)

L'elevato confinamento garantito dal cabinato mitiga significativamente la dispersione di ammoniaca nell'ambiente circostante, ma richiede di prevenire la formazione di miscela infiammabile (mediante estrazione dell'aria contaminata) e l'innescò (sgancio energia elettrica al gruppo frigo).

Anche per la ventilazione si riscontrano soluzioni differenziate con vario grado di complessità, esemplificate di seguito:

- a) ventilatore unico sempre in funzione, con la funzione di rimuovere il calore dal cabinato e garantire il numero di ricambi orari richiesti dal DM 10 Giugno 1980;

- b) ventilatore dedicato di elevata capacità per garantire il raffreddamento interno del gruppo e del cabinato, per gruppi di elevata potenza, più ventilatore di emergenza normalmente fermo, commisurato alla portata minima richiesta dal DM 10 Giugno 1980 e attivato dal sistema di rilevamento ammoniacca;
- c) doppio ventilatore (uno di riserva all'altro), normalmente non in funzione, attivato quando necessario dalla misura di temperatura nel cabinato oppure dal sistema di rilevamento ammoniacca, dimensionato adeguatamente per raffreddare o garantire il numero di ricambi orari richiesti in base dal DM 10 Giugno 1980 [1].

Svolgendo l'analisi di rischio, si ottengono risultati differenti per quanto concerne la probabilità di mancato funzionamento del sistema di ventilazione, che poi costituisce un fattore moltiplicativo per la frequenza associabile allo sviluppo di un'esplosione nel cabinato; uno dei risultati dell'analisi di rischio è anche la determinazione del livello SIL associato alla funzione strumentata di sicurezza che vede nei rilevatori di ammoniacca l'elemento iniziatore e nei ventilatori di estrazione l'elemento finale. A seconda dei casi, è stato determinato un livello SIL pari a 1 o 2, che deve poi essere preso in carico:

- dal fornitore del gruppo per garantirne un'adeguata implementazione;
- dal gestore dello Stabilimento per assicurarne il corretto test periodico.

3. Sistema di abbattimento (assorbimento con acqua)

Per i gruppi frigo in cabinato, si è posto il problema di trattamento dell'ammoniaca presente nell'aria rilasciata in atmosfera.

Nella preparazione della documentazione tecnica ai fini della valutazione del progetto, sono state effettuate simulazioni di rilascio di ammoniacca dal camino di uscita del ventilatore di estrazione, supponendo una perdita da flangia in fase liquida all'interno del cabinato ed utilizzando il package PHAST della DNV Technica.

Ciò ha consentito di fornire indicazioni in merito all'altezza ed alla direzione di efflusso, per evitare una ricaduta di ammoniacca al suolo a concentrazione superiore all'IDLH.

Anche in questo caso si riscontrano soluzioni differenziate:

- a) cabinato dotato di camino di espulsione dell'aria direttamente in atmosfera, al di sopra del cabinato stesso (gruppi di piccola taglia);
- b) cabinato dotato di camino di espulsione dell'aria direttamente in atmosfera, con altezza e direzione di efflusso dimensionate per non avere ricadute elevate al suolo (non si raggiunge l'IDLH);
- c) cabinato dotato di sistema di lavaggio (scrubber) incorporato al di sopra del cabinato stesso, in cui viene erogata acqua per assorbire l'ammoniaca presente nell'aria.

L'ultima soluzione è ovviamente quella più efficace e adeguata quando l'hold-up del circuito è consistente, orientativamente da alcune centinaia di kg di ammoniacca in su; è una soluzione comunque complessa, perché richiede l'impiego di una pompa, dotata di riserva, che preleva l'acqua dal serbatoio su cui sono collettati gli scarichi delle valvole di sicurezza, con riciclo dell'acqua post lavaggio nel serbatoio stesso.

La logica di sicurezza comandata dai sensori di ammoniaca diventa quindi più articolata, perché deve attivare anche questa circolazione.

In base alle analisi di rischio condotte, stante la facilità di dispersione di ammoniaca in atmosfera, non è risultato necessario garantire un livello SIL per l'assorbimento dell'ammoniaca, ma l'azionamento della pompa (con attivazione automatica di quella di riserva in caso di mancata partenza) è configurato in modo analogo a quello del sistema di ventilazione con due estrattori d'aria.

Un punto di approfondimento proponibile riguarda il dimensionamento dello scrubber; in base a quanto rilevato nella documentazione tecnica dei fornitori, sono stati adottati rapporti ben differenti tra la portata di acqua da erogare e la portata di ammoniaca rilasciata (da 5 a 50) e solo in un caso viene specificato un tempo di permanenza minimo per consentire l'assorbimento.

Per i gruppi frigo in box aperto su di un lato o con scambiatori all'esterno, la mitigazione del rilascio di ammoniaca deve essere indirizzata all'erogazione di acqua, normalmente prelevata dalla rete antincendio ed erogata sotto forma di goccioline fini per consentire l'assorbimento dell'ammoniaca.

Anche in questo caso sono state esaminate differenti configurazioni:

- a) gruppo frigo tutto all'interno del box aperto su di un lato; la geometria del locale porta necessariamente all'installazione di una barriera d'acqua lungo il lato aperto, con direzione dall'alto verso il basso;
- b) gruppo frigo con gli scambiatori all'aperto; il sistema di erogazione dell'acqua può essere concepito come un sistema a diluvio (erogatori posti al di sopra delle apparecchiature) per coprire l'area delle sorgenti di rilascio con getti conici diretti verso il basso, oppure barriera d'acqua perimetrale, con getto verso l'alto o verso il basso, a seconda della quota delle sorgenti di rilascio, degli ingombri presenti e della disponibilità di supporti per i collettori della barriera.

Nel caso a) la progettazione e la realizzazione risultano nettamente più semplici; i parametri di progetto di base da considerare sono la portata specifica al metro (in genere non meno di 30 litri/minuto metro) e il rapporto tra la portata di acqua erogata e la portata di ammoniaca rilasciata (in genere non inferiore a 50).

È ovviamente critica la selezione del rilascio di riferimento, poiché l'ammoniaca nel gruppo frigo può essere presente:

- Gassosa, a bassa temperatura e pressione
- Gassosa, ad alta pressione e temperatura superiore a quella ambiente,
- Liquida, ad alta pressione,
- Liquida, a bassa pressione.

La condizione più critica è quella di ammoniaca liquida ad alta pressione e questo è anche il motivo per cui si adottano connessioni tutte saldate. Per l'ammoniaca liquida è quindi necessario garantire una portata specifica più elevata, anche allo scopo di fornire

adeguato calore e garantirne la vaporizzazione totale, che facilita la dispersione della nube verso l'alto.

Nel caso b) la progettazione del sistema di mitigazione è più difficile; in assenza di standard, bisogna necessariamente identificare un caso di rilascio di riferimento, proporre differenti portate specifiche di erogazione acqua e considerare quale parte o lato della barriera possa risultare efficace, stante la direzionalità del getto, la distanza della barriera dallo stesso, la presenza di ostacoli sullo sviluppo del getto (condizione favorevole per incrementare l'efficienza di assorbimento). Si stima quindi la portata utile di acqua, che necessariamente costituisce solo una frazione di quella erogata, da rapportare a quella di ammoniacca.

In base alle informazioni tratte dalla letteratura specifica e da studi condotti su HF, una favorevole efficienza di abbattimento può essere ottenuta con un rapporto acqua/ammoniaca di almeno 30 a 1.

Facendo riferimento all'evento incidentale citato nel paragrafo "Prevenzione dei rilasci di ammoniacca", l'attivazione automatica della barriera d'acqua ha permesso di mitigare perfettamente le conseguenze, non essendo stata avvertita presenza di ammoniacca da parte dei componenti della squadra di emergenza intervenuta, appena al di là della barriera d'acqua rispetto alla sorgente di rilascio.

5. Scenari incidentali

La presenza di diversi sistemi di mitigazione delle conseguenze comporta, nel corso dell'analisi degli incidenti di un gruppo frigo, la necessità di identificare ed esaminare numerosi scenari, a partire dall'evento iniziatore (perdita di ammoniacca all'interno del cabinato, in particolare).

Si tratta cioè di accoppiare un livello di gravità delle conseguenze ed un ordine di grandezza della frequenza, ad esempio, per i seguenti scenari:

- rilascio senza intervento del sistema di rilevamento, con accumulo e successiva diffusione di ammoniacca gassosa all'esterno, da sfiato in quota (ventilatore in marcia) oppure da apertura di aerazione (ventilatore non in marcia);
- come sopra, più innesco della miscela nel campo di infiammabilità all'interno del cabinato;
- rilascio con attivazione del sistema di rilevamento, ma senza partenza del ventilatore di emergenza (con vari sotto-casi legati alla presenza e funzionamento o meno di un ventilatore dedicato per il semplice raffreddamento del cabinato);
- come sopra, più innesco della miscela nel campo di infiammabilità (con sotto-casi legati alla fermata o meno del ventilatore di raffreddamento o del gruppo frigo stesso, condizioni che incidono sulla probabilità di innesco assegnabile);
- rilascio con attivazione del sistema di rilevamento e del sistema di estrazione aria di emergenza, ma senza partenza delle pompe di circolazione dell'acqua per assorbire la frazione principale dell'ammoniaca in aria.

A titolo di esempio, si riportano i grafici "Side View", ottenuti utilizzando il package PHAST-PROFESSIONAL 8.9 della DNV-Technica Ltd, per lo studio della dispersione di ammoniaca per tre scenari incidentali. Il grafico traccia i limiti della concentrazione di interesse (300 ppm pari al valore di IDLH dell'ammoniaca, per due tipologie di classi atmosferiche e due diverse velocità del vento) della nube, sezionata secondo un piano verticale, in corrispondenza del suo asse.

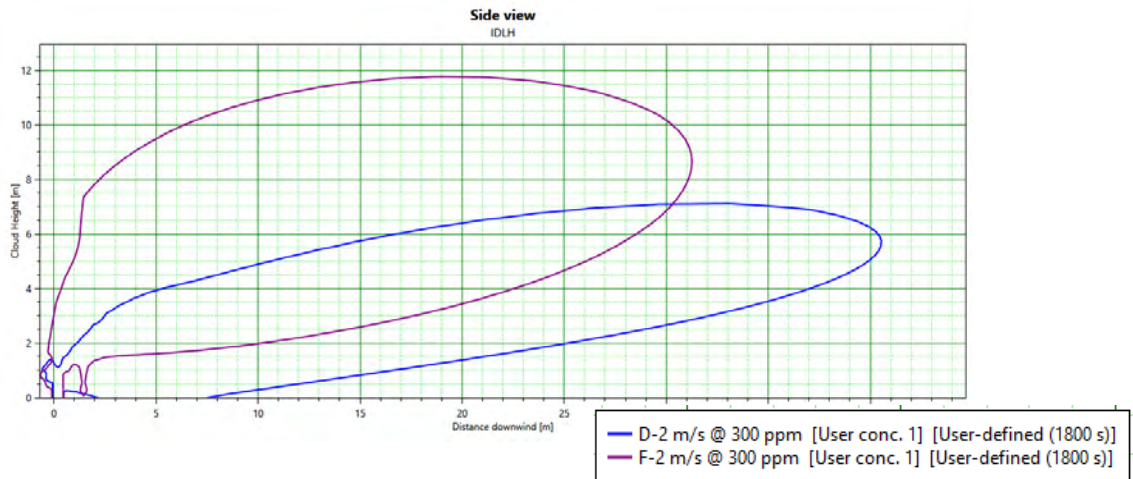


Grafico 1. Rilascio senza intervento del sistema di rilevamento, con accumulo e successiva diffusione di ammoniaca gassosa all'esterno, da apertura del cabinato a livello del suolo

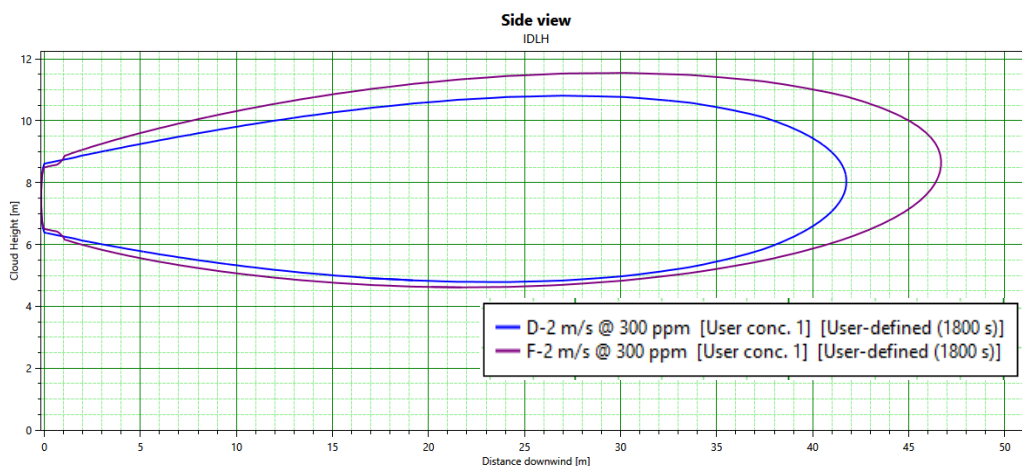


Grafico 2. Rilascio con attivazione del sistema di rilevamento e del sistema di estrazione aria di emergenza, senza partenza delle pompe di circolazione dell'acqua per assorbire la frazione principale dell'ammoniaca in aria

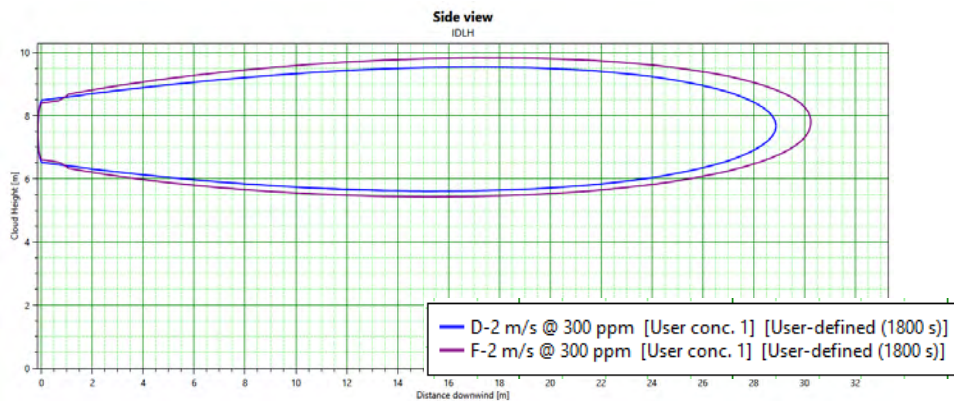


Grafico 3. Rilascio con attivazione del sistema di rilevamento e del sistema di estrazione aria di emergenza con partenza delle pompe di circolazione dell'acqua per assorbire la frazione principale dell'ammoniaca in aria, considerando un abbattimento pari al 50%

L'insieme degli scenari ipotizzabili può diventare quindi molto elevato; la gestione della valutazione è risultata meno complicata per Società che disponessero di una metodologia di analisi del rischio mediante applicazione di una matrice di rischio "corporate" e tecnica di valutazione basata su svolgimento HazOp e LOPA (Layer Of Protection Analysis), piuttosto che su applicazione di alberi degli eventi piuttosto complessi.

L'applicazione della LOPA ha consentito anche una maggiore partecipazione e condivisione da parte del team incaricato dell'analisi e costituito per lo più da uno/due componenti della ditta fornitrice (processista / project engineer), processista e responsabile di progetto dello Stabilimento, analista di rischio.

6. Gestione di un rilascio prolungato da un gruppo frigo

Un ulteriore spunto di approfondimento riguarda la gestione di un rilascio da gruppi frigo di elevata taglia, con hold-up di gas dell'ordine delle tonnellate, per i quali la perdita di contenimento potrebbe perdurare per lungo tempo sino a svuotamento delle apparecchiature contenenti ammoniaca.

Bisogna quindi valutare se, dopo verifica del corretto funzionamento del sistema di estrazione e della fermata del gruppo frigo, sia fattibile, in sicurezza, un intervento di un operatore all'interno del cabinato, per chiudere valvole sul circuito e isolare il più possibile il punto di rilascio, così da limitare la quantità rilasciabile e conseguentemente la durata dell'emergenza.

La valutazione non risulta semplice e potrebbe non essere condivisa da tutti gli attori.

Possibili miglioramenti possono essere previsti in fase di progettazione iniziale:

- inserimento di valvole di sezionamento, comandate da remoto e/o dalla logica di blocco del gruppo frigo, tali da isolare i principali hold-up di ammoniaca in fase liquida e quindi non dover richiedere alcun intervento di personale all'interno del cabinato, sino al rilevamento di concentrazioni minime di ammoniaca;

- installazione di un serbatoio di blow-down in fase liquida, con linee di collegamento ai principali recipienti/scambiatori dotate di valvole automatiche comandabili a distanza, per consentire lo scarico del liquido in un recipiente di accumulo, con caratteristiche di progetto congruenti con quelle del gruppo frigo. La soluzione proposta è la più drastica, ma già utilizzata in impianti chimici per la gestione di fluidi particolarmente pericolosi, oppure in gruppi di generazione di calore mediante circolazione di olio diatermico, anche in questo caso presente in quantità relativamente elevata.

7. Spunti per un miglioramento della sicurezza

Lo standard di realizzazione dei gruppi frigoriferi ad ammoniaca è ormai piuttosto consolidato, con molte migliaia di unità distribuite nel mondo; il processo di generazione del freddo non presenta ovviamente novità.

L'aspetto della sicurezza in caso di perdita di contenimento di ammoniaca dal circuito è invece ancora in una fase evolutiva e, ovviamente migliorativa, rispetto a quanto previsto dal DM 10 Giugno 1980 [1] e dallo stesso UNI EN 378 [2].

L'introduzione in anni recenti di gruppi in cabinato ha generato nuovi sviluppi nella valutazione degli incidenti, per raggiungere un livello più elevato di prevenzione e protezione.

Gli aspetti relativi al rilevamento della perdita, all'estrazione dell'aria contaminata di ammoniaca ed infine all'assorbimento dell'ammoniaca stessa sono stati esaminati nel corso dell'analisi degli incidenti, ricavando indicazioni per ulteriori affinamenti (ad esempio: soglie di intervento rilevatori e logiche di blocco, livello SIL per le funzioni strumentate di sicurezza, altezza e direzione di scarico dell'aria a valle dell'estrattore, etc.).

Gli spunti di approfondimento riguardano l'implementazione delle logiche di sicurezza con un livello SIL, il dimensionamento dello scrubber a servizio dei gruppi in cabinato, i criteri di progetto dei sistemi di abbattimento con acqua per gruppi ubicati interamente o parzialmente all'interno di un box con un lato aperto.

L'approccio tramite analisi degli incidenti deve essere previsto sin dall'inizio della fase di progettazione di base. Per gruppi di grossa taglia, dall'inizio della progettazione sino alla messa in servizio possono passare più di due anni; un ritardo nell'esecuzione delle analisi (HazOp, LOPA etc.) comporta in genere discussioni prolungate fra fornitore e utente, con possibile ritardo nella messa in servizio, prolungando l'utilizzo di gruppi frigo ormai obsoleti, meno efficienti e/o contenenti fluidi frigoriferi non più ammessi.

L'analisi di rischio permetterà anche di selezionare al meglio quali sistemi di mitigazione prevedere per un gruppo frigo di piccola taglia (meno di 100 kg) rispetto ad uno contenente varie tonnellate di gas pericoloso, avente ovviamente un potenziale livello di gravità delle conseguenze ben differente.

Pur confidando nelle indicazioni dell'analisi incidenti, in base a quanto sinora illustrato ed all'evoluzione tecnologica riscontrata, sarebbe auspicabile adottare una delle seguenti azioni, tra loro in alternativa:

- a) introdurre, nell'ambito della UNI EN 378 [2], nuove indicazioni in merito ai sistemi di sicurezza da prevedere, commisurati in base alla quantità di ammoniaca presente;
- b) impostare un aggiornamento del DM 10 Giugno 1980 [1];
- c) elaborare una specifica regola tecnica di prevenzione incendi, analogamente a quanto disponibile per generatori elettrici di emergenza e macchine elettriche.

8. Bibliografia

[1] Decreto Ministeriale 10 Giugno 1980, Riconoscimento di efficacia di sistemi di sicurezza applicati agli impianti frigoriferi industriali ad ammoniaca

[2] UNI EN 378-2, Sistemi di refrigerazione e pompe di calore - Requisiti di sicurezza e ambientale - Parte 2: Progettazione, costruzione, prova, marcatura e documentazione

[3] Decreto Legislativo 26 giugno 2015, n. 105, Attuazione della direttiva 2012/18/UE relativa al controllo del pericolo di incidenti rilevanti connessi con sostanze pericolose

Correlazione tra progettazione di attrezzature a pressione e normativa sugli spazi confinati

G. Vaccaro¹, f. Moncini²

¹ Inail - Uot di Palermo

² Inail - Uot di Torino

Abstract

Scopo della trattazione è individuare correlazioni e discordanze tra i principi della progettazione di attrezzature in pressione (con la relativa Direttiva P.E.D. 2014/68/UE e le connesse norme armonizzate) ed i dettami normativi, le regole, le indicazioni operative elaborate in vari ambiti a salvaguardia dei lavoratori che operano in ambienti sospetti di inquinamento o confinati.

Le considerazioni relative alla compatibilità tra la progettazione e la gestione successiva riguarderanno le attrezzature ante-P.E.D. ancora in esercizio, le attrezzature P.E.D. in esercizio ed in progetto, i dettami del d.lgs. 81/08, le norme e specifiche, estese anche all'ambito europeo, relative all'ambito degli spazi confinati ed ai connessi aspetti antropometrici.

Keywords: spazi confinati, progettazione, verifiche periodiche.

1. Introduzione

Secondo quanto previsto dal d.p.r. 177/2011¹, con particolare riferimento all'art.3 c.3, *“durante tutte le fasi delle lavorazioni in ambienti sospetti di inquinamento o confinati deve essere adottata ed efficacemente attuata una procedura di lavoro specificamente diretta ad eliminare o, ove impossibile, ridurre al minimo i rischi propri delle attività in ambienti confinati”*.

Nel caso specifico verrà affrontata la tematica della salvaguardia dei lavoratori in correlazione con la progettazione di attrezzature/insiemi a pressione che, secondo quanto espresso nell'art.70 c.1 del d.lgs. 81/08, *“devono essere conformi alle specifiche disposizioni legislative e regolamentari di recepimento delle direttive comunitarie di prodotto”*, nella fattispecie la P.E.D., con particolare riferimento al dimensionamento dei passi d'uomo e delle aperture di ispezione, così come previsto nel RES 2.4.

La presente trattazione sarà rivolta ai generatori di vapore a tubi da fumo, per necessità di sintesi ma soprattutto per la caratteristica dell'obbligatorietà biennale della visita interna, imposta prima dal d.m. 01/12/2004 n.329 allegato B, poi dal d.lgs.

¹ “Regolamento recante norme per la qualificazione delle imprese e dei lavoratori autonomi operanti in ambienti sospetti di inquinamento o confinanti, a norma dell'articolo 6, comma 8, lettera g), del d.lgs.81/08”.

81/08 allegato VII e quindi dal d.i. 11/04/2011 allegato II punto 4.4, che rende la correlazione di cui sopra ancor più stringente.

Ovviamente è necessario tenere in considerazione anche il concetto espresso dall'art.15 c.1 del d.lgs. 81/08, secondo cui la tutela del lavoratore debba partire dall'eliminazione del rischio alla fonte, con la conseguente limitazione dell'operatività "all'esterno". Quindi nei casi di incompatibilità tra la salvaguardia della salute e della sicurezza e l'intervento in spazi confinati diventa obbligatorio il riferimento a metodologie alternative basate sul progresso tecnico.

2. Il concetto di spazio confinato

Non esiste ancora una definizione a livello normativo.

Per dare un significato agli ambienti sospetti d'inquinamento o confinati si può far riferimento ai concetti espressi da:

- d.lgs. 81/08 art.66 "Lavori in ambienti sospetti di inquinamento" ove si individuano come tali pozzi neri, fogne, camini, fosse, gallerie ed in generale (...) ambienti e recipienti, condutture, caldaie e simili, ove sia possibile il rilascio di gas deleteri (...). Quando possa esservi dubbio sulla pericolosità dell'atmosfera (...).

L'apertura di accesso a detti luoghi deve avere dimensioni tali da poter consentire l'agevole recupero di un lavoratore privo di sensi;

- d.lgs. 81/08 art.121 "Presenza di gas negli scavi";
- d.lgs. 81/08 Allegato IV punto 3 "Vasche, canalizzazioni, tubazioni, serbatoi, recipienti, silos";

ed anche, a titolo esemplificativo, da:

- OSHA "Occupational Safety and Health Administration" – U.S.A.

Many workplaces contain areas that are considered "confined spaces" because while they are not necessarily designed for people, they are large enough for workers to enter and perform certain jobs. A confined space also has limited or restricted means for entry or exit and is not designed for continuous occupancy. Confined spaces include, but are not limited to, tanks, vessels, silos, storage bins, tunnels, pipelines, etc. (Molti luoghi di lavoro contengono aree considerate "spazi confinati" perché, sebbene non siano necessariamente progettati per le persone, sono abbastanza grandi da consentire ai lavoratori di entrare ed eseguire determinati lavori. Uno spazio confinato ha anche passaggi limitati o ristretti per l'ingresso o l'uscita e non è progettato per un'occupazione continua. Gli spazi confinati includono, a titolo esemplificativo ma non esaustivo, serbatoi, recipienti, silos, contenitori di stoccaggio, condutture, tubazioni...);

- HSE "Health and Safety Executive" – "Confined Spaces Regulations 1997" – U.K.
"Confined space" means any place, including any chamber, tank, vat, silo, pit, trench, pipe, sewer, flue, well or other similar space in which, by virtue of its enclosed nature, there arises a reasonably foreseeable specified risk ("Spazio confinato" indica qualsiasi luogo, compresa qualsiasi camera, cisterna, vasca, silo, fossa, trincea, tubazione, fognatura,

canna fumaria, pozzo o altro spazio simile in cui, in virtù della sua natura chiusa, si presenta un rischio specifico ragionevolmente prevedibile).

Nella presente trattazione si considereranno simili i significati di “luogo confinato”, “ambiente confinato”, “ambiente sospetto di inquinamento”, in quanto simili saranno le considerazioni e le procedure.

3. Aspetti antropometrici

L'accessibilità all'interno di attrezzature a pressione è legata sia a dimensione e forma geometrica dell'apertura sia alla presenza di ostacoli/impedimenti al di là dell'apertura stessa.

Nel caso specifico di generatori a tubi da fumo il fascio tubiero stesso comporta un impedimento all'ingresso.

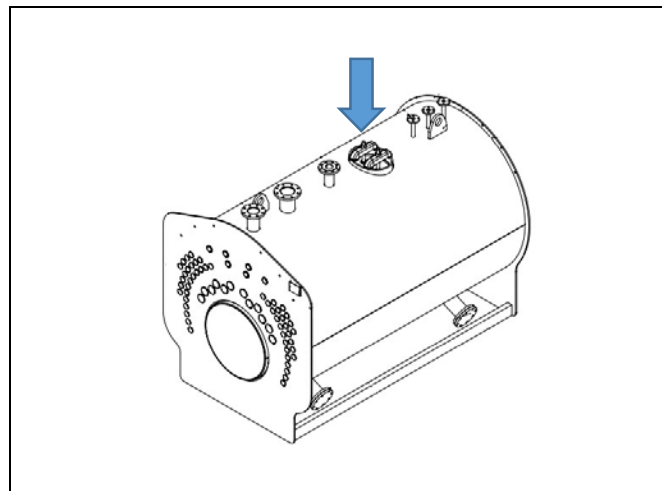


Figura 1. Vista generatore di vapore a tubi da fumo e relativo passo d'uomo

Il d.lgs. 81/08 allegato IV punto 3.1 fa genericamente riferimento a dimensioni minime (*“Le tubazioni, le canalizzazioni e i recipienti, quali vasche, serbatoi e simili, in cui debbano entrare lavoratori per operazioni di controllo, riparazione, manutenzione o per altri motivi dipendenti dall'esercizio dell'impianto o dell'apparecchio, devono essere provvisti di aperture di accesso aventi dimensioni tali da poter consentire l'agevole recupero di un lavoratore privo di sensi”*).

Qualora sia necessario l'ausilio ad esempio di autorespiratori, secondo quanto previsto al punto 3.2.4. (*“Quando la presenza di gas o vapori nocivi non possa escludersi in modo assoluto o quando l'accesso al fondo dei luoghi predetti è disagiata, i lavoratori che vi entrano devono essere muniti di cintura di sicurezza con corda di adeguata lunghezza e, se necessario, di apparecchi idonei a consentire la normale respirazione.”*) si deve tener conto anche dell'ingombro di tali dispositivi.

Analogamente, anche nel caso di adozione di DPI le dimensioni minime degli accessi devono tener conto del loro ingombro.

Indicazioni più specifiche, anche se riferite a macchinari in genere, si possono ottenere dalle:

- UNI EN 547-1:2009 "Principi per la determinazione delle dimensioni richieste per le aperture per l'accesso di tutto il corpo nel macchinario"
- UNI EN 547-2:2009 "Principi per la determinazione delle dimensioni richieste per le aperture di accesso"
- UNI EN 547-3:2009 "Dati antropometrici"
- UNI EN ISO 7250-1:2017 "Misurazioni di base del corpo umano per la progettazione tecnologica"

La norma UNI EN 547-3:2009 specifica i requisiti per le misurazioni del corpo umano attualmente accettati, cioè i dati antropometrici, richiesti dalle UNI EN 547-1 e UNI EN 547-2 per calcolare le dimensioni delle aperture di accesso utilizzate nei macchinari. I valori riportati tengono conto del solo corpo nudo, non prendendo in considerazione movimenti del corpo, presenza di indumenti o di attrezzature (es. DPI o autorespiratori) e neanche delle condizioni ambientali. I valori rappresentano una platea di uomini e donne dell'area geografica europea e vengono espressi in percentili (95° - 99°).

La EN 547-1 adotta i valori suddetti per il dimensionamento delle aperture di accesso per l'intero corpo, mentre la EN 547-2 viene applicata per l'accesso di parti del corpo. Nel nostro caso specifico trova maggiormente applicazione la EN 547-1 dovendosi effettuare le visite interne de visu mentre si può ritenere la EN 547-2 utile nel caso di riferimento a tecniche parzialmente in remoto.

Le misure del corpo umano da prendere in considerazione per la progettazione tecnologica sono citate nella UNI EN ISO 7250-1:2017.

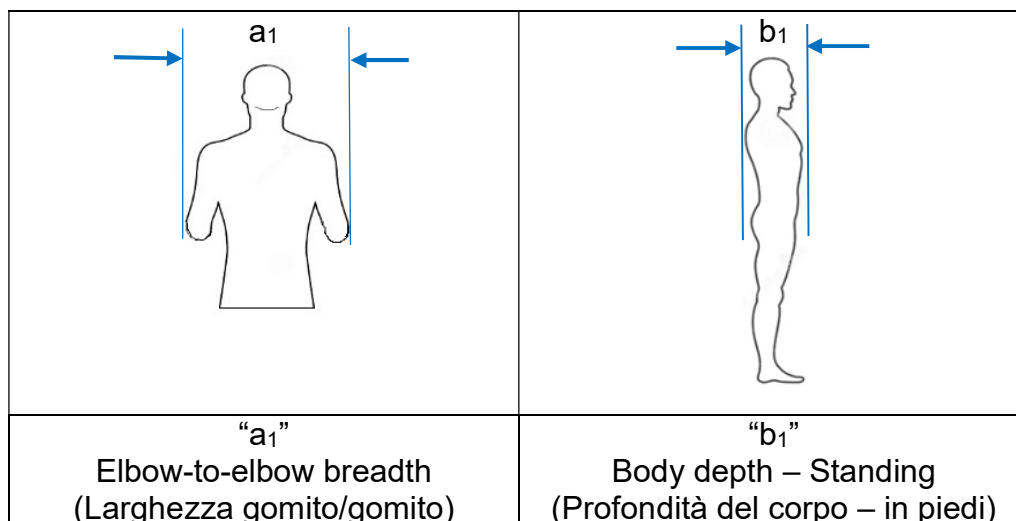


Figura 2. Rappresentazione (profondità e larghezza) del corpo umano per la progettazione tecnologica

È chiaramente specificato nella EN 547-1 che i valori indicati per le aperture di passaggio rappresentino il valore minimo, non quello ottimale, e che nell'ottica della sicurezza i valori risultanti sarebbero, se possibile, da incrementare. Questo ipotetico incremento dovrebbe tener conto anche dell'eventualità di dover evacuare celermente in caso di pericolo.

La EN 547-3 riporta i seguenti valori:

| | | |
|----------------|------------------------------|----------|
| a ₁ | Elbow-to-elbow breadth (P95) | 545 [mm] |
| | Elbow-to-elbow breadth (P99) | 576 [mm] |
| b ₁ | Body depth (P95) | 342 [mm] |

Tabella 1. Dati antropometrici al percentile P95/P99

La EN 547-1, che prenderemo in considerazione in quanto, come già detto, calcola i valori minimi delle aperture per l'accesso dell'intero corpo, riporta le seguenti formule:

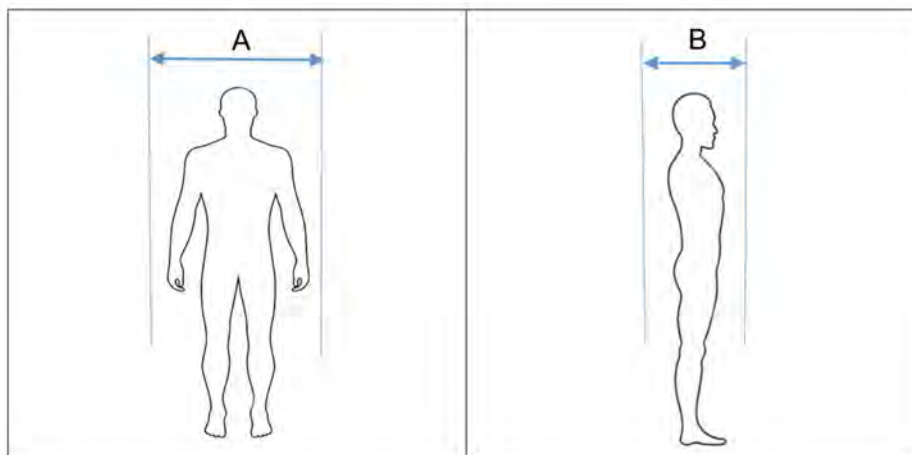


Figura 3. Dimensioni apertura

$$A = a_1 (P95 \text{ or } P99) + y \quad (1)$$

$$B = b_1(P95) + y \quad (2)$$

Volendo applicare il P95 in entrambe le misure:

$$A = 545 + y$$

$$B = 342 + y$$

Il valore "y" rappresenta la tolleranza da aggiungere al valore antropometrico al fine di garantire la salute e la sicurezza dell'operatore che attraversa il passaggio. Il valore da far assumere ad "y" non è tuttavia esclusivamente additivo poiché alcune condizioni si sovrappongono ed il valore effettivo deve essere il risultato di un'integrazione di fattori effettuata da persona esperta.

Tra i fattori che la EN 547-1 individua, quelli applicabili al caso di ingresso in attrezzature a pressione possono essere:

| | |
|---|--------|
| Tolleranza base per il movimento del corpo | 50 mm |
| Abbigliamento da lavoro | 20 mm |
| Abbigliamento invernale pesante o di protezione individuale | 100 mm |
| Trasporto di persona infortunata | 200 mm |

Tabella 2. Valori di “y” applicabili all’ingresso in attrezzature a pressione

Si può ipotizzare un valore minimo generico che tenga conto, ad esempio, dei primi due fattori, ottenendo:

$$A = 615 \text{ mm}$$

$$B = 412 \text{ mm}$$

Vengono poi individuate dalla norma altre condizioni di accesso quali ad esempio il passo d’uomo con necessità di movimento rapido, un’apertura con entrata in posizione inginocchiata, l’impiego di una scala per l’ingresso nell’apertura.

Rimanendo al caso specifico di ingresso in passo d’uomo di generatore di vapore a tubi da fumo, trattandosi di apertura ellittica, la rappresentazione della configurazione minima è la seguente:

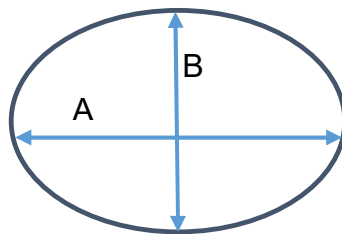


Figura 4. Ellisse dimensioni minime apertura

4. La progettazione

L'allegato VII del d.lgs. 81/08, nonché il d.i. 11/04/2011 che ne disciplina le modalità di effettuazione, prevede che i generatori di vapor d'acqua siano sottoposti a visita interna con periodicità biennale.

Come già detto, il d.lgs. 81/08 art. 66 prevede che le aperture di accesso debbano avere *“dimensioni tali da poter consentire l'agevole recupero di un lavoratore privo di sensi”* ed analogamente l'allegato IV punto 3.1 prevede che le tubazioni, le canalizzazioni e i recipienti, quali vasche, serbatoi e simili, in cui debbano entrare lavoratori per operazioni di controllo, riparazione, manutenzione o per altri motivi dipendenti dall'esercizio dell'impianto o dell'apparecchio, debbano essere provvisti di *“aperture di accesso aventi dimensioni tali da poter consentire l'agevole recupero di un lavoratore privo di sensi”*.

Il d.lgs. 81/08 fornisce quindi indicazioni solo qualitative in merito al dimensionamento delle aperture.

Prima del d.lgs. 81/08 e prima della Direttiva P.E.D., la Raccolta E2 all'art.10 specificava che la visita interna è "da eseguirsi con l'ausilio di idonei mezzi di controllo e di ispezione" ed il d.p.r. 547/1955³ all'art. 235 specificava, quantitativamente, che "Le tubazioni, le canalizzazioni ed i recipienti, quali vasche, serbatoi e simili, in cui debbano entrare lavoratori per operazioni di controllo, riparazione, manutenzione o per altri motivi dipendenti dall'esercizio dell'impianto o dell'apparecchio, devono essere provvisti di aperture di accesso aventi dimensioni non inferiori a cm 30 per 40 o diametro non inferiore a cm 40".

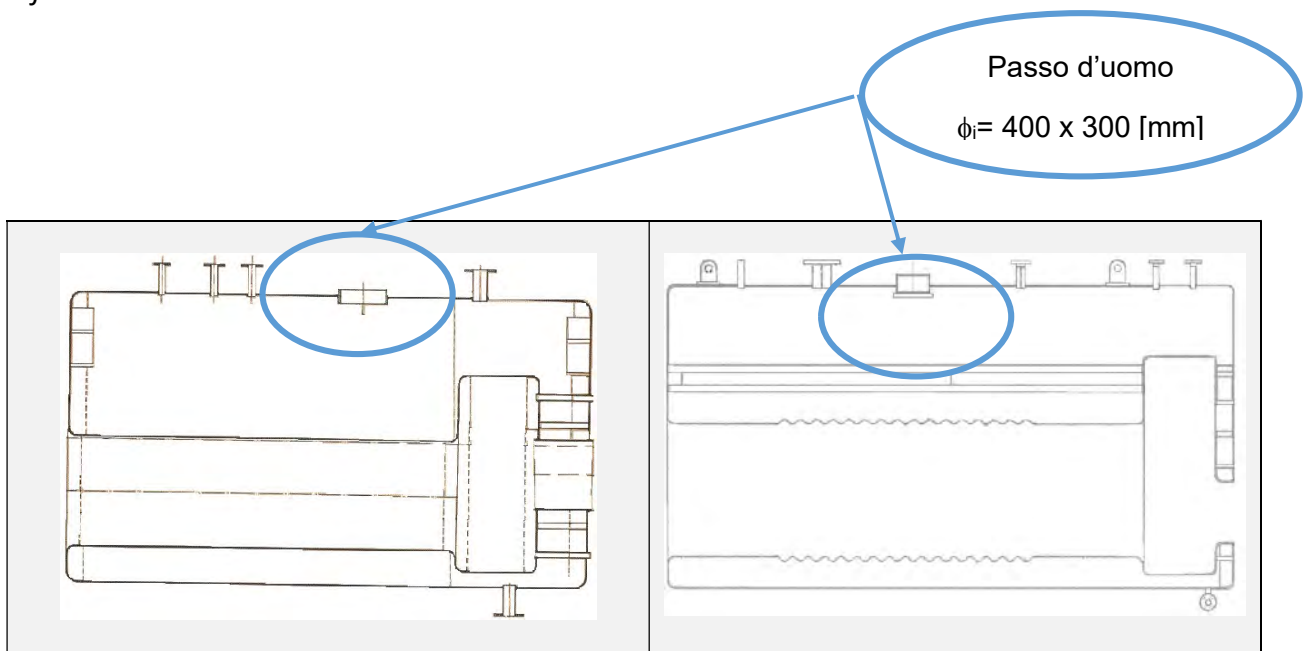


Figura 5. Generatore di vapore ante d.lgs. 81/08 ed ante-P.E.D. (anno 1985)

Figura 6. Generatore di vapore (anno 2001)

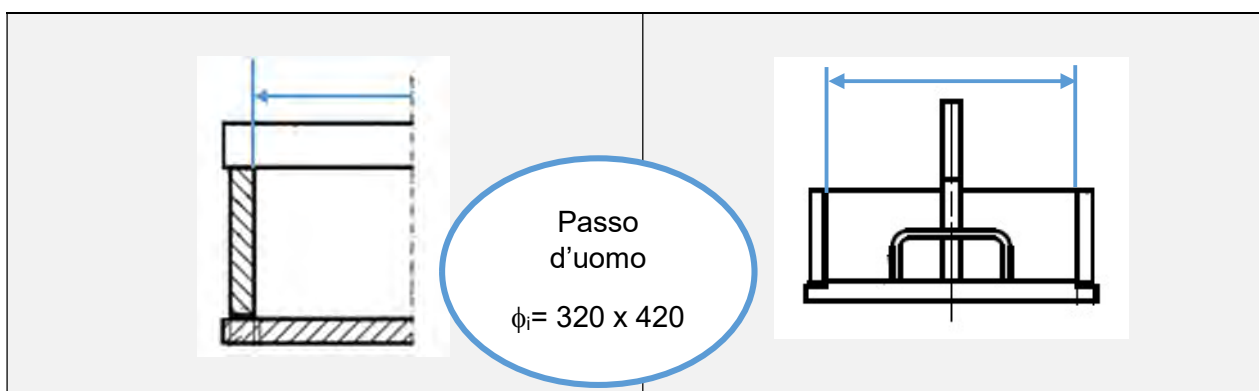


Figura 7. Estratto generatore di vapore (anno 2008)

Figura 8. Estratto generatore di vapore (anno 2018)

² Specificazioni tecniche applicative del d.m. 21/05/1974

³ Norme per la prevenzione degli infortuni sul lavoro

Per quanto concerne la UNI EN 12953-3:2016⁴ (punto 14) anche in questo caso ovviamente la progettazione deve prevedere l'accessibilità all'interno per le fasi di ispezione.

I valori minimi del passo d'uomo, in analogia a quanto già espresso in figura 7 e 8, sono:

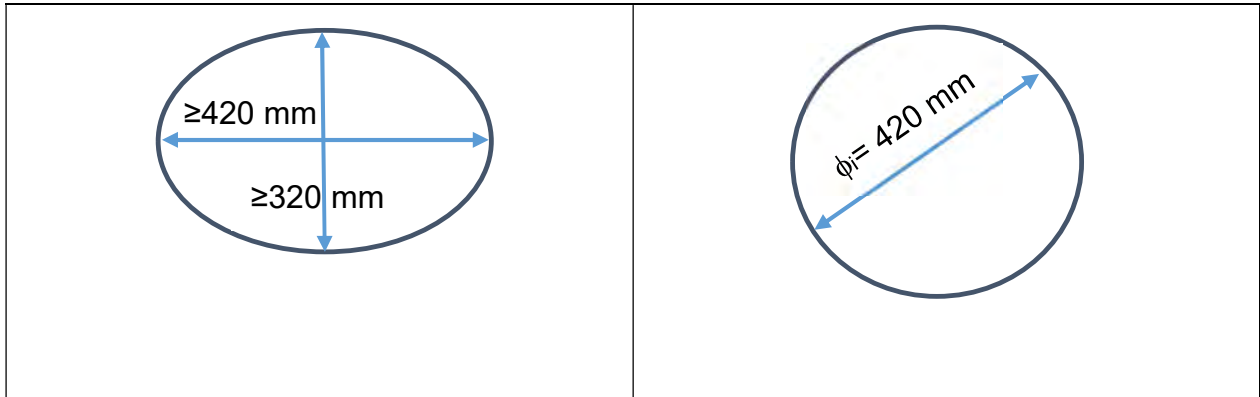


Figura 9. Ellisse minima EN 12953-3:2016

Figura 10. Diametro interno passo d'uomo

L'attenzione viene tuttavia rivolta esclusivamente all'efficacia della visita interna, valutata come direttamente proporzionale alla vicinanza dell'occhio all'elemento. L'impossibilità di effettuare un'ispezione visiva ravvicinata viene comunque contemplata, in mancanza di possibilità oggettiva di ingresso completo (esempio diametro fasciame tra 800 e 1400 mm). In tal caso viene ammesso l'ingresso della sola testa, come requisito minimo.

Per diametri del fasciame $d_o < 800$ mm è permessa la progettazione dei generatori con metodi alternativi mirati al perfezionamento della visita interna, come ad esempio fori per la testa, accessi attraverso connessioni flangiate, scollegamento di tubazioni dai rispettivi bocchelli (purché con $DN \geq 50$) ed in tali casi sono ammesse tecniche di ispezione visiva in remoto⁵, impiegando ad esempio endoscopi.

La luce (g), intesa come distanza minima tra filo inferiore dell'anello dell'apertura e l'interno del generatore, deve essere ≥ 400 mm per permettere l'accesso per intero dell'operatore.

⁴ EN 12953-3:2016 (armonizzata alla P.E.D.) - Caldaie a tubi da fumo – Parte 3: Progettazione e calcolo delle parti in pressione

⁵ RVI Remote Visual Inspection

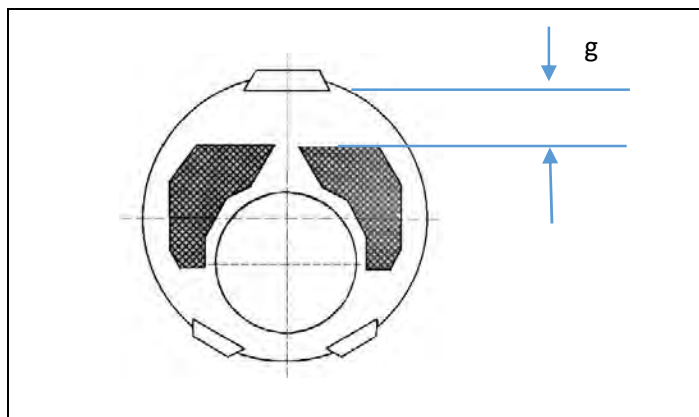


Figura 11. Sezione frontale – distanza passo d'uomo / fascio (UNI EN 12953-3:2016)

In genere tale distanza si attesta, negli attuali generatori, intorno a 600 mm e rappresenta anche l'altezza del percorso orizzontale dell'operatore all'imbocco del passo d'uomo. Questo è anche lo spazio, esiguo, entro cui dover effettuare, in sicurezza, le operazioni di recupero con eventuale ausilio di barella ed eventuale necessità di installazione di sistema di aerazione forzata.

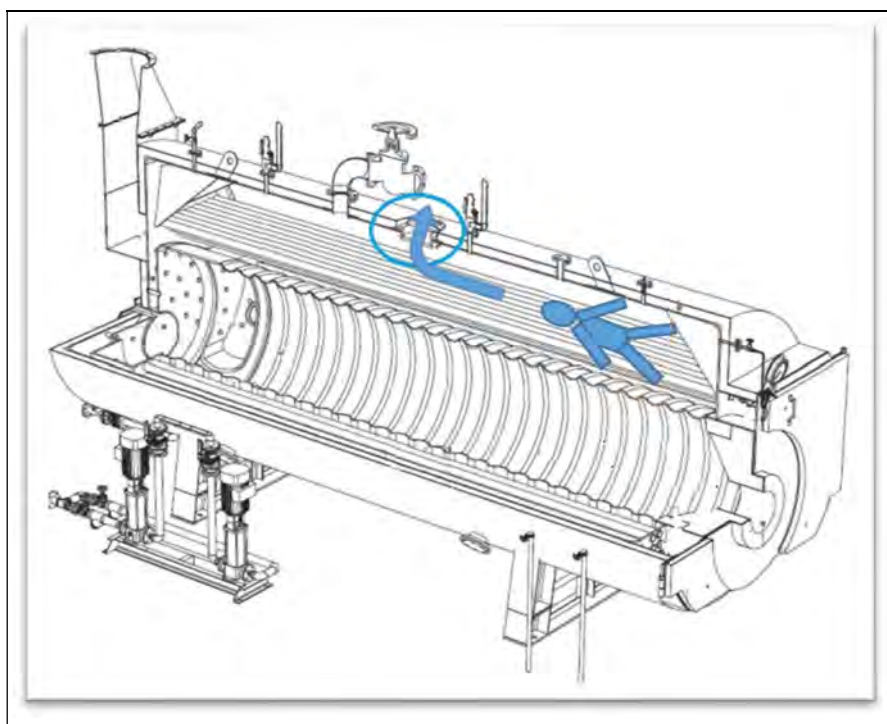


Figura 12. Spaccato generatore tubi fa fumo con operatore infortunato

5. Conclusioni

Quanto fino ad ora espresso fa chiaramente riferimento alla progettazione di attrezzature in pressione, nel caso specifico di generatore di vapore, prevista per la normale sequenza di operazioni (esercizio, verifica, ispezione).

Alla luce di quanto sopra è quindi assodata la consapevolezza da parte del Fabbrikante e del Legislatore della difficoltà di accesso che già si manifesta in queste procedure di routine.

Trattandosi di spazi confinati la progettazione non può tuttavia esulare dal considerare, nel ciclo vita dell'attrezzatura, la gestione globale e quindi anche il caso di recupero di persona infortunata o priva di sensi.

Nei casi di generatori di nuova costruzione si può ipotizzare una soluzione progettuale che garantisca contestualmente il rispetto dei requisiti essenziali di sicurezza imposti dalla Direttiva 2014/68/UE ed il rispetto dei dettami normativi che regolamentano l'ambito degli spazi confinati.

La revisione in quest'ottica dei calcoli di progetto può comportare, tra altri fattori, anche la necessità di compensare le aperture incrementate con un aumento degli spessori delle membrature. Tuttavia, una valutazione in tal senso rimane auspicabile. Nel caso di generatori esistenti, siano essi progettati con codici VSG o EN, ovviamente tale soluzione non è applicabile.

Cercando ugualmente di coniugare le necessità della progettazione (P.E.D. o ante P.E.D.) e della sicurezza nell'ambito degli spazi confinati, gli accessi o le aperture di ispezione possono comunque rappresentare il mezzo necessario a condurre la visita interna in fase di verifica periodica.

Traendo spunto dall'indicazione fornita dalla UNI EN 12953-3:2016 per i generatori con diametro fasciame $d_o < 800$ mm (punto 14.1 lett. c) sarebbe auspicabile la valorizzazione a livello normativo di tecniche d'ispezione visiva in remoto, o altro derivante dal progresso tecnico, per tutte le attrezzature a pressione, ove coniugare i due aspetti non risulti diversamente realizzabile.

6. Bibliografia

[1] <https://www.osha.gov/confined-spaces>

[2] HSE Health and Safety Executive. Confined Spaces Regulations 1997. *Approved Code of Practice and guidance (ACOP)*. Third edition 2014; volume: pag.61.

[3] Comitato regionale di coordinamento art.7 d.lgs. 81/08 Regione Emilia-Romagna. Indicazioni operative in materia di sicurezza ed igiene del lavoro per i lavori in ambienti confinati. Settembre 2019; Pagine 116.

[4] Dipl.-Ing. Rainer Schubert. Salvataggio di persone in serbatoi e spazi angusti: un

[5] problema sottovalutato. KAN Brie. Anno 2013; Volume 2; Pagina 5.

[6] Ing. Adriano Paolo Bacchetta. Spazi confinati: l'accesso negli apparecchi a pressione. Punto Sicuro. Anno 2014; numero 3295; Pagine 8.

- [7] UNI EN 547-1:2009 – Sicurezza del macchinario – Misure del corpo umano - “Principi per la determinazione delle dimensioni richieste per le aperture per l'accesso di tutto il corpo nel macchinario”.
- [8] UNI EN 547-2:2009 – Sicurezza del macchinario – Misure del corpo umano - “Principi per la determinazione delle dimensioni richieste per le aperture di accesso”.
- [9] UNI EN 547-3:2009 – Sicurezza del macchinario – Misure del corpo umano - “Dati antropometrici”.
- [10] UNI EN ISO 7250-1:2017 – Dimensioni del corpo umano da utilizzare per la progettazione tecnologica – Parte 1: Definizioni delle dimensioni del corpo umano e dei punti di reperi anatomico.
- [11] EN 12953-3:2016 - Caldaie a tubi da fumo – Parte 3: Progettazione e calcolo delle parti in pressione.

Esercizio sicuro di attrezzature critiche nella raffinazione di petroli ad elevato contenuto di zolfo: un approccio innovativo

G. Ancione¹, V. Bartolozzi², P. Bragatto³, M. F. Milazzo¹

¹Dipartimento di Ingegneria, Università di Messina

²Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente

³Dipartimento di Ingegneria, Università Campus Bio-Medico

Abstract

I petroli ad alto contenuti di zolfo consentono di ridurre i costi di approvvigionamento, tuttavia accelerano la corrosione da solfidazione, che può causare perdite di contenimento. In funzione dei valori di temperatura e contenuto di zolfo, le velocità di corrosione possono variare di due ordini di grandezza per il medesimo materiale. Per la gestione del fenomeno, nella pratica corrente, si fa riferimento alle curve di McConomy, in cui la velocità di corrosione è messa in relazione con temperatura, contenuto di zolfo e l'acidità, anche se in realtà il fenomeno è più complesso. Per superare le incertezze insite nella pratica corrente, è stata sviluppata una rete bayesiana, nella quale i dati estratti dalle curve di McConomy si usano per l'addestramento. La rete, alimentata continuamente dai dati di esercizio, consente di stimare la vita utile consumata e gestire in sicurezza il ciclo di vita di scambiatori soggetti a solfidazione. Analogamente è anche possibile controllare il rischio di rottura casuale delle linee. Il modello è stato validato su un periodo pluriennale, durante il quale si sono verificate condizioni molto diverse. L'insieme di dati utilizzato proviene da un impianto reale ed è stato arricchito da dati generati usando le catene di Markov. Il metodo proposto rappresenta un'alternativa dinamica ai metodi classici ed è utile per controllare i rischi di rottura dovuti a solfidazione.

Keywords: Sulfidazione, Reti Bayesiane, Scambiatori di Calore, Raffinerie, Vita Utile Residua, Rotture Casuali.

1. Introduzione

Nel settore petrolifero i costi di approvvigionamento della materia prima incidono fortemente sul costo totale; la lavorazione di grezzi meno pregiati consente il loro abbattimento, sebbene i benefici debbano essere bilanciati con i rischi che ne derivano. L'utilizzo di grezzi aggressivi potrebbe ridurre la vita utile degli impianti ed aumentare la probabilità di incidente [1] a causa del fenomeno della solfidazione. Un report del 2019 dell'American Petroleum Institute [2] riporta almeno 45 incidenti gravi in 30 anni causati da solfidazione dovuta agli alti contenuti di zolfo nelle cariche alle raffinerie. Le conoscenze scientifiche disponibili sull'argomento sono alla base del

metodo pratico adottato per controllare il fenomeno, ma molti aspetti non sono ancora ben compresi e richiederebbero approfondimenti di ricerca [3]. La corrosione da sulfidazione si manifesta a temperature superiori a 220°C e provoca un assottigliamento generale e in qualche caso localizzato. Il fenomeno può essere rapido con rilascio di sostanze infiammabili, spesso al di sopra della loro temperatura di autoaccensione. Si distinguono due meccanismi diversi in funzione del contenuto di idrogeno, che può essere in forma libera o come idrogeno solforato. Se non è presente idrogeno si parla di sulfidazione H₂-free, questo rappresenta il fenomeno più diffuso e su cui si concentra l'attenzione del presente lavoro. Tra le unità di raffineria più colpite dalla sulfidazione c'è la distillazione atmosferica. L'erosione e la corrosione localizzata sono cause concorrenti di migliaia di guasti degli scambiatori, in particolare in quelli realizzati in acciaio al carbonio [4]. L'acciaio al carbonio è il materiale più utilizzato fino a 260°C, in quanto il più economico, ma quando si opera in condizioni più severe, si usano acciai basso legati con contenuti crescenti di cromo, fino al 12%. Dalla metà degli anni 80 si prevedono anche di piccoli quantitativi di silicio (0,2%), che aumentano notevolmente la resistenza alla sulfidazione [5]. Tuttavia, negli impianti più vecchi, gli eventuali adeguamenti dei materiali sono scelti in base a criteri di sostenibilità economica.

La sulfidazione H₂-free dipende dalle caratteristiche del materiale, dalla temperatura, dal contenuto di zolfo, e dall'acidità dovuta alla presenza degli acidi naftenici. La velocità di corrosione aumenta al crescere della temperatura, dell'acidità e dello zolfo, anche se la presenza di composti dello zolfo ha un effetto inibitore sugli acidi naftenici, che comincia attorno ai 220°C ed è particolarmente attivo fra i 300 e i 380°C. La sulfidazione è assente al di sotto dei 220°C; mentre la corrosione naftenica si manifesta con temperature superiori ai 140°C [6].

La dipendenza della velocità di corrosione dalla temperatura e dal contenuto di zolfo e acidità è descritta dalle curve di McConomy, che non tengono conto di quanto segue.

- Il tenore di zolfo è determinato dalla presenza di vari composti alcuni dei quali sono meno attivi ai fini corrosione, stesso discorso vale per l'acidità [7];
- L'esposizione prolungata determina un forte rallentamento della corrosione, per passivazione del materiale, favorita dalla presenza di ossigeno nel fluido [8];
- Le temperature sono misurate al centro del flusso, mentre i valori sulle pareti possono essere più elevati [9], la presenza di particelle solide in sospensione, bolle o vortici possono avere effetti erosivi, sinergici [10]. La corrosione è anche influenzata dalla presenza di altre sostanze, inclusi metalli pesanti e vapore acqueo [3].
- Un fattore moltiplicativo per velocità di flusso superiori a 30,5 m/s tiene conto della fluidodinamica [11], tuttavia flussi superiori alla soglia possono staccare materiale e quelli troppo lenti o stagnanti possono accelerare la corrosione [2].

Le ipotesi semplificative, descritte sopra, sono ragionevoli e le tabelle API permettono di gestire il problema sulfidazione. Non vanno, tuttavia, prese come regole deterministiche ma come ipotesi a priori abbastanza attendibili. L'acquisizione dell'esperienza nelle operazioni del singolo impianto consente di avere i dati a posteriori per aggiustare al contesto le ipotesi a priori secondo un approccio bayesiano. Acquisendo su un periodo di tempo abbastanza lungo i dati di esercizio relativi ad un impianto specifico si possono correggere le probabilità a priori (generiche) ed ottenere le velocità di corrosione aggiornate, o meglio, la distribuzione di probabilità per le diverse velocità di corrosione, aggiornate in base al contesto attuale. L'obiettivo di questo lavoro è presentare come questo approccio bayesiano possa essere declinato in alcune situazioni pratiche, che si presentano in una raffineria che lavora anche grezzi ad alto contenuto di zolfo.

2. Valutazione del RUL di attrezzature soggette a sulfidazione

La vita utile residua RUL è uno dei parametri più rappresentativi per indicare il grado di affidabilità di un'attrezzatura in esercizio. Esso rappresenta l'intervallo di tempo a partire dal momento presente durante il quale l'attrezzatura può essere esercitata in sicurezza. In un approccio convenzionale, il RUL al tempo t è semplicemente il tempo di vita utile definito dal progettista, con riferimento particolare ai sovrassessori, sottratto del tempo trascorso dalla sua messa in esercizio t_0 . In un approccio più evoluto (approccio RBI), il RUL sarà ricalcolato ogni volta che si svolge un'ispezione sull'attrezzatura per la verifica delle condizioni reali, considerando, fra l'altro, gli eventuali sovrassessori restanti.

Le raffinerie sono organizzate secondo il modello RBI, che permette di calcolare i RUL delle varie attrezzature e fissare, di conseguenza, la periodicità delle ispezioni. La metodologia RBI tiene conto degli effetti dei vari meccanismi di deterioramento, nonché di tutte le condizioni tecniche e gestionali che possono influire negativamente o positivamente sulla vita delle attrezzature. Sulla base delle aspettative di vita utile calcolate ad un certo tempo si calcola anche l'intervallo delle ispezioni in modo da minimizzare i rischi.

Le Integrity Operating Windows (IOW) hanno introdotto una certa flessibilità nella pratica lavorativa [12]. Le IOW fondamentalmente tengono conto delle variazioni dei parametri operativi che occasionalmente si verificano durante il funzionamento dell'impianto. Tali variazioni possono essere ad esempio dovute alle caratteristiche dei grezzi lavorati e il loro effetto si riflette sulla RUL attesa. L'approccio, proposto dall'API 584 [12], ha molti punti di forza ed alcuni punti deboli. Tra i punti di forza ci sono l'integrabilità con l'approccio RBI, descritto dalla API 581, e l'introduzione di un maggiore dinamismo nell'analisi.

Attraverso l'approccio RBI tradizionale, si ottiene una previsione dell'integrità di recipienti e tubazioni nel medio e lungo termine, della vita utile residua RUL e dell'intervallo prima della prossima ispezione. Con l'introduzione delle finestre operative, la previsione iniziale può essere aggiustata tenendo conto del cambiare

del contesto operativo. In particolare, nel caso specifico della sulfidazione, la lavorazione di grezzi più ricchi di zolfo del previsto può far operare l'impianto "fuori" dalle finestre operative, cioè in condizioni di corrosione accelerata, a causa delle quali occorrerà tener conto della rivalutazione del tempo di vita utile e del programma ispettivo. Questo porta indubbiamente grandi vantaggi rispetto all'approccio tradizionale, costituendo di fatto il primo passo verso una analisi RBI dinamica. Nella Figura 1 è mostrato un periodo di esercizio fuori dalla finestra operativa e l'influenza sul livello di rischio e sul tempo di vita atteso. Nel dettaglio il RUL risulta ridotto a causa del tempo passato fuori della finestra operativa.

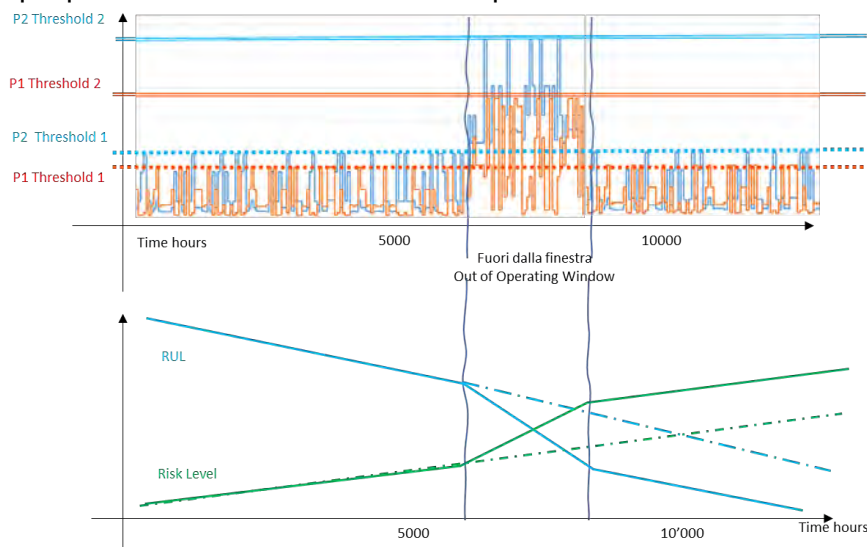


Figura 1. Andamento del RUL e del rischio a causa di sforamenti dalla IOW.

L'approccio delle IOW presenta alcuni punti di debolezza che lasciano aperti spazi di miglioramento e di ricerca. Di seguito si riporta una sintesi. Nelle applicazioni usuali dell'API 584 si presuppone che il rischio cresca in modo lineare al diminuire del RUL, ciò non è coerente con il ben noto andamento della curva a vasca da bagno. I parametri operativi presi in considerazione nelle applicazioni IOW sono pressione, temperature e flussi, non sono inclusi parametri complessi, quali la composizione chimica, la presenza di particolato sospeso o la turbolenza; inoltre, i limiti dei parametri operativi non sempre sono semplici da definire e spesso occorre combinare più parametri fra loro. In situazioni molto dinamiche, l'aggiustamento dei risultati l'analisi RBI fatta in precedenza può essere insufficiente a controllare la situazione; questo può essere il caso di un contesto economico e politico molto incerto che implichi una variazione continua dei grezzi da trattare e conseguentemente dei fenomeni corrosivi collegati.

1.2 Valutazione dinamica del RUL

L'approccio proposto in questo lavoro cerca di superare i limiti del metodo IOW sfruttando le potenzialità delle reti Bayesiane. Una rete Bayesiana (BBN) è un modello

grafico i cui nodi rappresentano variabili casuali discrete o continue. I nodi sono connessi da archi direzionali che rappresentano i nessi causali fra variabili. Una BBN è stata sviluppata per monitorare l'effetto della sulfidazione negli scambiatori di calore (Figura 2). Le regole, che associano la velocità di corrosione a temperatura, acidità (TAN) e contenuto percentuale di zolfo, sono probabilistiche, quindi, permettono di gestire le incertezze connesse al fenomeno della corrosione, tenendo conto meglio della continuità del fenomeno rispetto ai parametri. La perdita di vita utile nel periodo di osservazione ΔRUL è il nodo finale della rete che ha come nodi genitore la velocità di corrosione e le condizioni dell'attrezzature all'inizio del periodo di osservazione. Questo termine non è meno importante della velocità perché, quando si è vicini al termine della vita utile, aumenta la vulnerabilità del materiale secondo la citata bath-tube curve. La velocità di corrosione ha come nodi genitore la temperatura, TAN e contenuto di zolfo. La rete sviluppata combina dati quantitativi, cioè misure, con valutazioni quantitative fornite degli esperti.

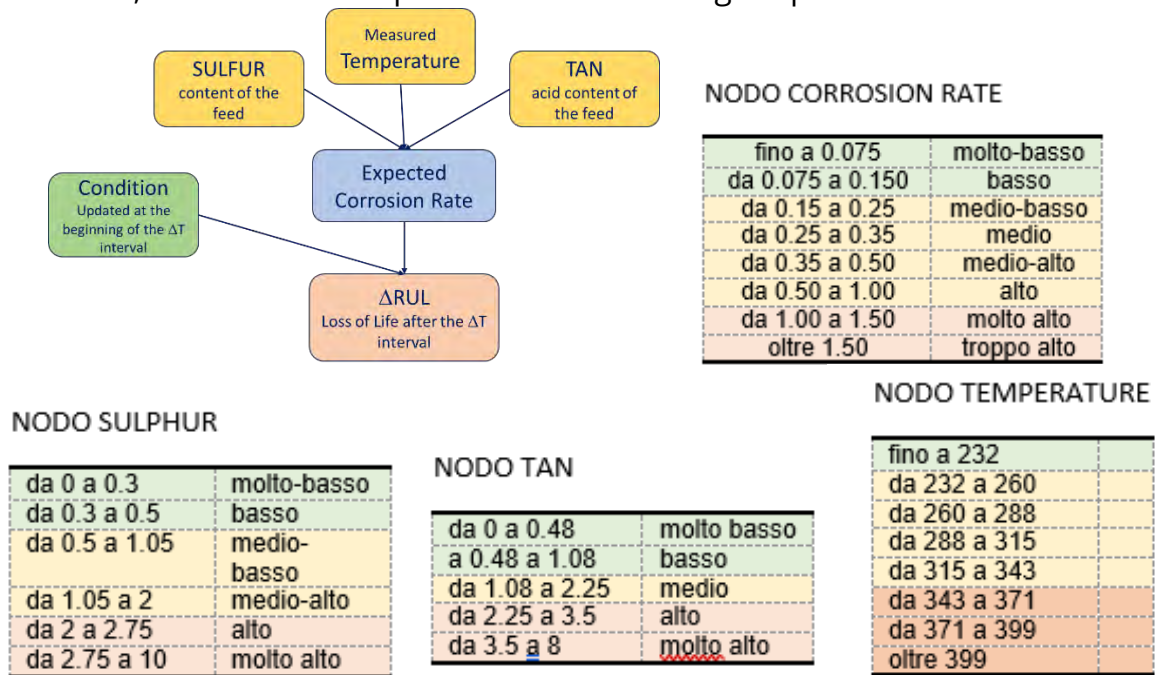


Figura 2. Rete bayesiana per la valutazione dinamica del RUL.

Nella BBN, zolfo, TAN e temperatura e corrosione sono nodi quantitativi, mentre le condizioni è un nodo qualitativo. Lo scopo della rete è calcolare, a partire un certo tempo t_i , la probabilità di perdita di vita utile ΔRUL dopo un certo tempo Δt . ΔRUL dipenderà della distribuzione probabilistica dei tre fattori influenti sulla sulfidazione tra gli stati riportati in Figura 2. La velocità di corrosione è un nodo intermedio, collegato ai tre nodi precedenti in base alle curve di McConomy. Gli stati del nodo "condition" rappresentano la percentuale di vita consumata (Figura 3). Questo nodo tiene conto dell'effetto "bath tube curve", in pratica quando l'attrezzatura si avvicina al termine della vita utile, la probabilità di guasto cresce, aumentando la probabilità

di una perdita di vita maggiore. In pratica si individuano quattro condizioni possibili: normale, attenzione, critica e molto critica.

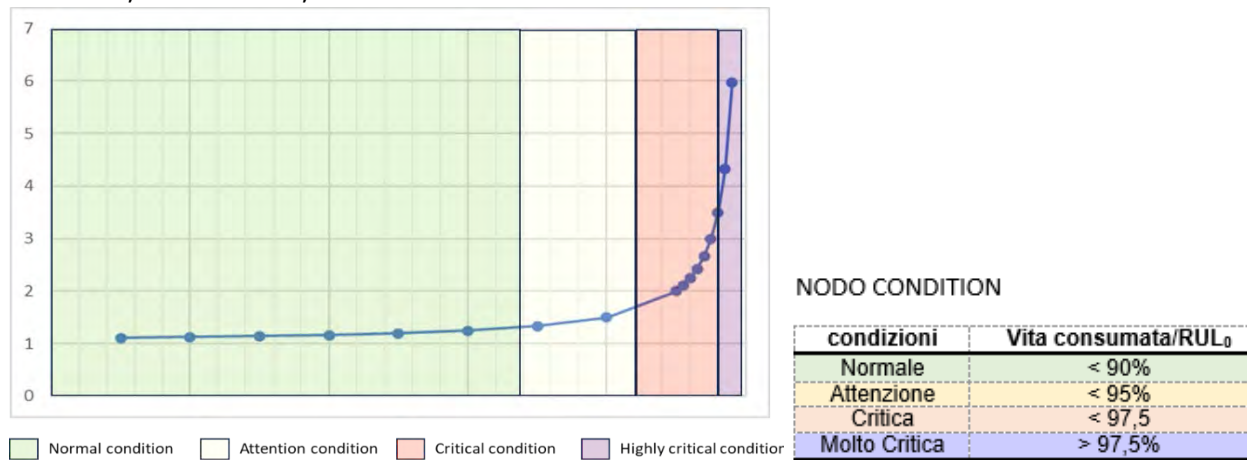


Figura 3. Rappresentazione nodo "Condition" e relativi stati.

La BBN serve a calcolare la distribuzione di probabilità di vita consumata dopo un tempo Δt . Il nodo ΔRUL rappresenta il risultato ottenuto ed ha cinque possibili stati. Per ogni stato la perdita di vita utile è confrontata con il tempo trascorso. Secondo le aspettative a priori il tempo trascorso e la perdita di vita utile coincidono. Se la corrosione è meno aggressiva di quanto previsto e le condizioni sono buone il consumo di vita utile sarà minore del tempo trascorso. Al contrario se la corrosione sarà più aggressiva e magari le condizioni peggiori il consumo di vita utile sarà un multiplo del tempo trascorso. In modo più formale:

$$\Delta RUL = \sum_{j=1}^N w_j \cdot p_j \cdot \Delta t \quad (1)$$

dove N = numero di stati, w_j = fattore moltiplicativo associato allo stato j -esimo per conversione da tempo trascorso a vita consumata, p_j = probabilità stato j -esimo. Il numero di stati e il relativo "peso" sono definiti sulla base del parere di esperti. In Figura 4 si riportano i valori w_j e N per il caso studio illustrato nella sezione successiva. Nota la distribuzione degli stati del nodo "vita consumata", l'Equazione (1) si riscrive come segue:

$$\Delta RUL_i = (w_1 \cdot p_1 + w_2 \cdot p_2 + w_3 \cdot p_3 + w_4 \cdot p_4 + w_5 \cdot p_5) \cdot \Delta t_i \quad (2)$$

All'intervallo di tempo i -esimo, la RUL risultante sarà:

$$RUL_{i+1} = RUL_i + \Delta RUL_i \quad (3)$$

NODO ΔRUL

| | w_i | | |
|---------------|-------|--|--------------------------|
| ridotto | 0,5 | meglio rispetto alle aspettative | corrosione rallentata |
| normale | 1,0 | allineato rispetto alle aspettative | corrosione nella media |
| alto | 2,0 | peggio rispetto alle aspettative | corrosione più alta |
| molto alto | 3,0 | molto peggio rispetto alle aspettative | corrosione altissima |
| inaccettabile | 4,0 | estremamente peggio | Condizioni inaccettabili |

Figura 4. Stati nodo ΔRUL .

Il valore iniziale RUL_0 è calcolato a priori in occasione dell'ultima fermata dell'impianto con ispezione completa. La RUL ad ogni ciclo di calcolo sarà aggiornata al tempo t_{i+1} . Ad ogni intervallo di tempo gli stati dei nodi zolfo, temperatura e TAN, si aggiornano in base ai dati rilevati nell'intervallo di tempo Δt , mentre per il nodo condizioni si fa riferimento ai risultati del ciclo precedente. Ad ogni ciclo, la RUL risultante andrà confrontata con RUL_0 per ricalcolare il nuovo stato del nodo condizione (vedi tabella in Figura 3). Con questa soluzione è stato possibile introdurre la dipendenza dal tempo nelle BBN.

Gli stati del nodo condizione supportano la scelta dell'intervallo di tempo che intercorre per la successiva ispezione. Infatti, se le condizioni sono buone si potrà prendere un valore abbastanza lungo, ad esempio annuale, e su quella base raccogliere i dati e ripetere il ciclo di aggiornamento del RUL. Quando le condizioni passano via negli stati attenzione, critica e molto critica gli intervalli vanno ridotti drasticamente. I valori suggeriti sono rispettivamente 6, 3 e 1 mesi rispettivamente per gli stati di attenzione, critico e molto critico. Il ciclo di calcolo verrà ripetuto dal tempo iniziale quando $RUL = RUL_0$ fino a quando si arriverà alle condizioni $RUL_{fin+1} \leq 0$. Sotto queste condizioni l'esercizio dell'attrezzatura per un ulteriore intervallo di tempo non è consentito. Quando applicando l'Equazione (3) si prevede che la RUL dopo un intervallo Δt assuma valori negativi è obbligo fermare l'esercizio per non incorrere in condizioni inaccettabili.

3. Caso Studio

Il modello è stato validato su un periodo pluriennale in cui si sono verificate condizioni molto diverse. Il caso studio è un'unità di distillazione atmosferica (topping), l'attenzione si è concentrata su l'ultimo scambiatore (M1) posto in testa ad un treno di preriscaldamento che porta la temperatura del grezzo, prima di entrare nel forno a circa 240°C e sulla linea da forno a colonna (M2). Il materiale è acciaio al carbonio in M1 e acciaio basso legato con cromo e molibdeno (tipicamente 5% Cr) in M2. I sovrassessori sono definiti in modo tale che le parti dello scambiatore abbiano un'aspettativa di vita utile sufficientemente lunga (tipicamente 15-20 anni) anche se eserciti con cariche relativamente aggressive, in termini di TAN e di contenuti di zolfo. Lo schema dell'impianto generico è riportato in modo semplificato nella Figura 5.

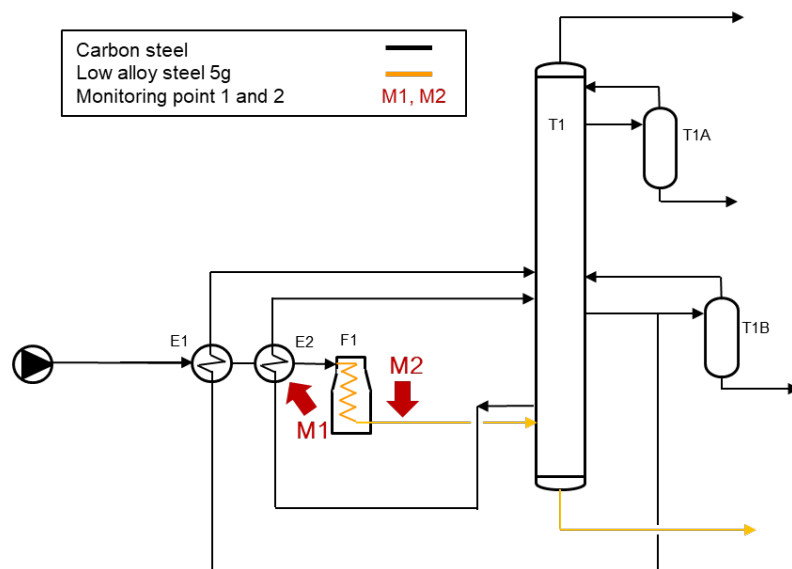


Figura 5. Schema unità distillazione: M1 = scambiatore, M2 = linea da forno a colonna.

3.1 Set di dati

I dati di letteratura disponibili sulla velocità di corrosione in funzione di temperatura, TAN e contenuto di zolfo (tabelle allegato 2.B.3 della linea guida API 581:2016) sono stati usati per l'addestramento della rete. La fase successiva è stata il caricamento dei dati di monitoraggio. I dati disponibili fanno riferimento a un mese di monitoraggio e sono la temperatura misurata su base oraria e lista dei grezzi utilizzati (contenuto di zolfo e TAN). Essendo l'arco temporale della raccolta dati non sufficiente per l'esecuzione delle simulazioni, sono state generate alcune sequenze credibili di TAN, zolfo e temperature, adatte a coprire un periodo di osservazione pari a 5 anni. Per la generazione dei dati sintetici si è utilizzata una catena di Markov omogenea, accoppiando un generatore casuale di numeri con la matrice di transizione si ottiene un andamento variabile della temperatura, che è simile, ma non identico, all'andamento nel periodo iniziale.

3.2 Greggi trattati

Per quanto riguarda i grezzi trattati, è stata immaginata una rotazione continua di quelli descritti in Tabella 1 in termini di contenuto di zolfo e TAN. Per rendere più significativi i dati si è anche immaginato che in certi periodi si scegliesse di lavorare solo grezzi di migliore qualità (Crude 01÷08), mentre in altri periodi non ci fossero limitazione e si lavorassero anche i greggi peggiori, per le ipotizzate opportunità commerciali.

| Crude type | SULFUR | TAN |
|------------|--------|------|
| Crude 01 | 0.14 | 0.36 |
| Crude 02 | 0.17 | 0.31 |
| Crude 03 | 0.28 | 0.85 |
| Crude 04 | 0.47 | 0.03 |
| Crude 05 | 0.51 | 1.55 |
| Crude 06 | 1.4 | 0.05 |
| Crude 07 | 1.96 | 0.11 |
| Crude 08 | 2.39 | 0.07 |

| Crude type | SULFUR | TAN |
|------------|--------|------|
| Crude 09 | 2.3 | 1.6 |
| Crude 10 | 2.64 | 3.44 |
| Crude 11 | 2.71 | 3.7 |
| Crude 12 | 3.15 | 2.46 |
| Crude 13 | 3.15 | 0.61 |
| Crude 14 | 4.08 | 0.2 |
| Crude 15 | 5.54 | 1.24 |

Tabella 1. Composizione dei 15 tipi di grezzo trattati nell'impianto

4. Risultati

In Figura 6 si riportano le distribuzioni di probabilità per le variabili di monitoraggio e per il nodo target relativamente ad un anno di simulazione e per il punto di monitoraggio M1 (scambiatore di calore in acciaio al carbonio). Occorre precisare che le condizioni iniziali sono assegnate in accordo a un RUL rimanente. Attraverso il consumo di vita utile e utilizzando l'Equazione (3), è possibile ricalcolare le condizioni dopo un $\Delta t = 1$ anno e avviare una nuova elaborazione su un successivo periodo di monitoraggio. Nella Figura 6(c) si riporta l'elaborazione a 9 anni in servizio, il periodo di monitoraggio è un anno. Dopo 9 anni, il RUL è notevolmente ridotto e sarà necessario ridurre l'intervallo di monitoraggio oppure intraprendere delle azioni (ispezione). In Tabella 2 si riportano i risultati di alcuni di cicli di elaborazioni in M1. Si osserva che al quinto ciclo (9 anni e 6 mesi), partendo da una condizione normale e inserendo i dati relativi a 6 mesi di monitoraggio si passa a una condizione di attenzione. L'elaborazione all'ottavo ciclo non è eseguita in quanto già le condizioni sono in partenza molto critiche.

Analogamente, in Figura 7 si riportano i risultati per il punto di monitoraggio M2 (tubazione in acciaio al cromo 5%). In Tabella 3 si riportano i risultati di alcuni di cicli di elaborazioni in M2. Si osserva che analogamente a quanto accade per l'elemento M1, a partire dal quinto ciclo si passa a condizioni di attenzione e poi critica, con conseguente riduzione dei tempi di osservazione da 12 a 6, 3 e 1 mese.

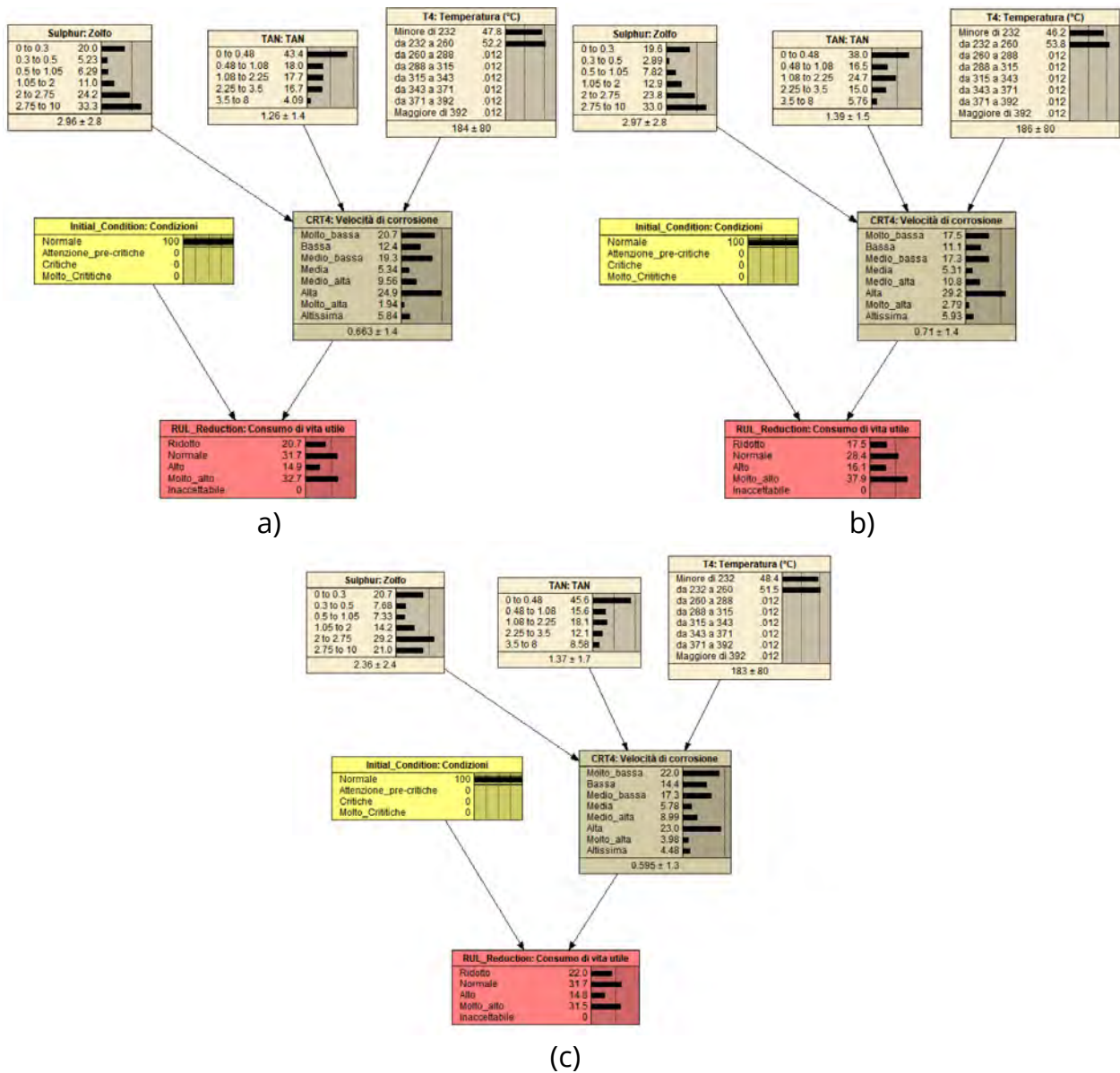


Figura 6. Risultati per M1, consumo di vita utile a 6, 7, 9 anni (righe 1,2 e 4 in tabella)

| ID | Periodo in servizio | Condizioni iniziali | Δt_i (mesi) | Consumo di vita (anni) | RUL _{i+1} (anni) | Condizione finale |
|----|---------------------|---------------------|---------------------|------------------------|---------------------------|-------------------|
| 1 | 6 | Normale | 12 | 0,96 | 4.04 | Normale |
| 2 | 7 | Normale | 12 | 1.06 | 2.98 | Normale |
| 3 | 8 | Normale | 12 | 1.01 | 1.97 | Normale |
| 4 | 9 | Normale | 12 | 0.94 | 1.03 | Normale |
| 5 | 9 + 6 mesi | Normale | 6 | 0.48 | 0.55 | Attenzione |
| 6 | 9 + 9 mesi | Attenzione | 3 | 0.31 | 0.24 | Critica |
| 7 | 9+ 10 mesi | Critica | 1 | 0.15 | 0.09 | Molto-Critica |
| 8 | 9 + 11 mesi | Molto-Critica | -- | -- | -- | -- |

Tabella 2. Elaborazioni del consumo di vita per vari periodi di monitoraggio (M1)

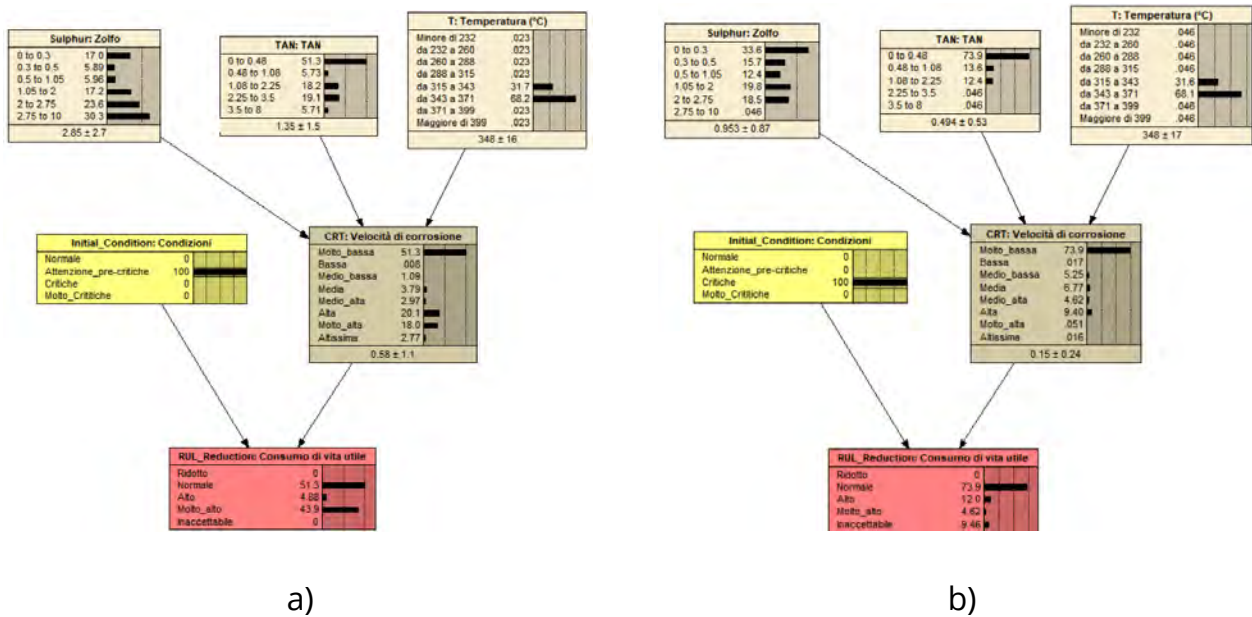


Figura 7. Risultati per M2, consumo di vita utile a 9,5 e 9,75 anni (righe 5 e 6 in tabella)

| ID | Periodo in servizio | Condizioni iniziali | Δt_i (mesi) | Consumo di vita (anni) | RUL _{i+1} (anni) | Condizione finale |
|----|---------------------|---------------------|---------------------|------------------------|---------------------------|-------------------|
| 1 | 6 | Normale | 12 | 0.96 | 4.04 | Normale |
| 2 | 7 | Normale | 12 | 1.07 | 2.97 | Normale |
| 3 | 8 | Normale | 12 | 1 | 1.97 | Normale |
| 4 | 9 | Normale | 12 | 0.92 | 1.05 | Normale |
| 5 | 9 + 6 mesi | Normale | 6 | 0.45 | 0.60 | Attenzione |
| 6 | 9 + 9 mesi | Attenzione | 3 | 0.3 | 0.30 | Critica |
| 7 | 9+ 10 mesi | Critica | 1 | 0.15 | 0.15 | Molto-Critica |
| 8 | 9 + 11 mesi | Molto-Critica | -- | -- | -- | -- |

Tabella 3. Elaborazioni del consumo di vita per vari periodi di monitoraggio (M2)

5. Conclusioni

Per poter cogliere le opportunità di mercato, l'industria petrolifera ha sviluppato tecniche sofisticate per poter lavorare con profitto e sicurezza materie prime difficili, quali i petroli ad alto contenuto di zolfo. In questo ambito il controllo della corrosione da sulfidazione a caldo è una delle sfide maggiori da affrontare. Per gestire questo problema, negli ultimi anni, i gestori hanno adottato l'approccio delle finestre operative IOW, integrato all'interno della gestione RBI. L'approccio della rete bayesiana proposto in questo lavoro appare innovativo in quanto consente di superare i limiti di dinamicità connessi con gli approcci correnti per la gestione della

vita utile degli impianti soggetti alla sulfidazione a caldo. La rete è stata sottoposta a test su un periodo di tempo di 10 anni.

A seguito della transizione energetica in corso, si potrebbe obiettare che in futuro, l'interesse verso i grezzi difficili è destinato inevitabilmente a diminuire. In realtà i tempi della transizione non sono veloci ed è probabile che acuendosi le instabilità del mercato energetico ci possa essere nell'immediato persino un temporaneo aumento di interesse per la raffinazione dei grezzi difficili. L'aspetto più importante è che i risultati mettono inoltre in evidenza la forza dell'approccio bayesiano dinamico, su problemi complessi di corrosione, per i quali vi è livello di conoscenza piuttosto empirico con notevoli margini di incertezza.

6. Ringraziamenti

Il lavoro è stato finanziato dall'INAIL all'interno del progetto BRIC 2019, ID = 2 DYN-RISK.

Si ringrazia la ditta ISAB s.r.l. di Priolo-Gargallo (SR) per la preziosa collaborazione.

7. Bibliografia

[1] Farrell, D., & Roberts, L. (2010, March). *A Study of high temperature sulfidation under actual process conditions. In NACE CORROSION (pp. NACE-10358). NACE.*

[2] API RP 939 *Guidelines for Avoiding Sulfidation (Sulfidic) Corrosion Failures in Oil Refinery*, 2019, American Petroleum Institute US.

[3] Rebak B. Sulfidic corrosion in refineries - a review. *Corrosion Reviews*. 2011, 29: 123-133

[4] Ali M., Ul-Hamid A., Khan T., Bake A., Butt H., Bamidele O.E., Saeed A. Corrosion-related failures in heat exchangers. *Corrosion Reviews*, 2021, 39(6): 519-546.

[5] Hau J. Predicting sulfidic and naphthenic acid corrosion. *Corrosion*, 2009, 65(12):831-844.

[6] Grim L., Tillema D., Cutchen S., Wingard M., Johnson A. CSB investigation of Chevron Richmond refinery pipe rupture and fire. *Process Safety Progress*, 2015. 34(4): 355-359.

[7] Ott B., Reza A. Considerations in Developing an Inspection Plan for Petrochemical Equipment in Sulfidation Service. *The 30th International Ocean and Polar Engineering Conference. OnePetro*, 2020.

[8] Sharifi-Asl S., Liang A., Cooke D., Chapman D.R., Chaloner-Gill B., Kuperman A.E. High-temperature sulfidic corrosion of carbon steel in model oil/sulfur compound blends. *Corrosion. OnePetro*, 2017.

- [9] Siva R., Mageshwaran G., Kallat S., Jeevahan J. Experimental investigation on the effect of corrosion and erosion on the shell and tube type heat exchanger. *International Journal of Ambient Energy*, 2021, 42(7):816-822.
- [10] M. Rezaei, Z. Mahidashti, S. Eftekhari, E. Abdi, 2020 Rezaei, M., Mahidashti, Z., Eftekhari, S., & Abdi, E. (2021). A corrosion failure analysis of heat exchanger tubes operating in petrochemical refinery. *Engineering Failure Analysis*, 119, 105011.
- [11] API RP 581 *Risk-Based Inspection Methodology*, 2016, 3rd edition American Petroleum Institute US.
- [12] API RP 584 *Integrity Operating Windows*, 2014, 2nd edition, American Petroleum Institute US.

L'utilizzo della Realtà Aumentata per la gestione dell'invecchiamento delle apparecchiature critiche attraverso un Sensore Virtuale

G. Ancione¹, P. Bragatto², R. Saitta¹, G. Fiumara³

¹ Università di Messina, Dipartimento di Ingegneria

² Università Campus Bio-Medico di Roma, Dipartimento di Ingegneria

³ Università di Messina, Dipartimento di Scienze Matematiche e Informatiche, Scienze Fisiche e Scienze della Terra

Abstract

Nell'industria di processo tutti i sistemi di contenimento primari sono soggetti a forme di deterioramento. Per gestire il rischio di incidenti rilevanti dovuti a tale fenomeno, la normativa vigente prevede controlli periodici per verificare le condizioni di salute (invecchiamento dell'apparecchiatura). Per supportare l'ispezione nell'affrontare questo compito, è stato progettato e sviluppato un Sensore Virtuale. Si tratta di un sistema, composto da hardware e software, che utilizza modelli matematici e la Realtà Aumentata per assistere le ispezioni in campo per il monitoraggio e la previsione dell'invecchiamento delle apparecchiature. Il Sensore Virtuale raccoglie informazioni relative al deterioramento e restituisce il tasso di corrosione, la probabilità del pit critico, l'evoluzione della corrosione tramite mappe di corrosione iso-linee e il RUL; infine, consente di visualizzare lo stato dell'attrezzatura attraverso la Realtà Aumentata (ad esempio, mediante mappe di spessore e tabelle che vengono sovraimpresse all'attrezzatura). Lo scopo di questo lavoro è presentare l'applicazione software e la sua interfaccia grafica, che è stata migliorata per ridurre al minimo gli errori dovuti all'interazione uomo-macchina. Un caso studio è stato utilizzato per mostrare il funzionamento del sensore virtuale.

Keywords: Invecchiamento apparecchiature critiche; Ispezioni; Realtà aumentata, Sensore virtuale, Safety.

1. Introduzione

Le tecnologie innovative come l'Internet of Things (IoT), l'intelligenza artificiale, big data, il cloud computing, i sistemi cyber-fisici, l'interconnettività, la realtà aumentata, ecc. hanno caratterizzato lo sviluppo dell'Industria 4.0 attraverso l'integrazione di sistemi fisici e digitali. Essi hanno portato molti vantaggi nel settore industriale, che si sono tradotti in maggiore efficienza, redditività, innovazione, personalizzazione, prestazioni [1]. Un altro aspetto importante da menzionare, come elemento di forza per l'Industria 4.0, è sicuramente il potenziale supporto per il miglioramento della

gestione della sicurezza, anche se attualmente ci sono solo pochi studi che analizzano l'integrazione tra la gestione della sicurezza e l'Industria 4.0 [2]. Tra questi, Gisbert et al. [3] hanno considerato che la tecnologia dell'informazione e le comunicazioni wireless consentono una rilevazione continua ed efficace dei pericoli sul luogo di lavoro, mentre Beetz et al. [4] hanno affermato che lo sviluppo di robot dedicati alla sicurezza potrebbe essere in grado di riconoscere azioni che possono causare lesioni ai lavoratori; Podgorski et al. [5] hanno osservato che l'equipaggiamento di protezione individuale, fornito di tecnologia di automazione, viene adottato nelle fabbriche intelligenti per ottenere una migliore gestione della sicurezza. Altri autori hanno invece evidenziato che l'intelligenza artificiale e le sue declinazioni mostrano di avere un grande potenziale soprattutto per quanto riguarda la manutenzione predittiva, ad esempio migliorando la diagnosi dei guasti critici degli equipaggiamenti [6,7] di macchine rotanti [8] o sistemi di trasporto [9] riducendo o eliminando le minacce per la sicurezza delle persone, delle merci e dell'ambiente.

L'Industria 4.0 mira a digitalizzare la produzione attraverso la condivisione e l'analisi delle informazioni, nonché la connessione tra esseri umani e macchine [10]. Le interazioni tra macchine e macchine e tra esseri umani e macchine rappresentano aspetti fondamentali di questo processo di digitalizzazione [2]; tuttavia, non sono prive di svantaggi. Le tecnologie emergenti e sperimentali causano un profondo cambiamento nella società, che ha bisogno di tempo per adattarsi e normalizzarsi attraverso nuovi paradigmi, nuove procedure, nuove leggi sul lavoro. Questo richiede alle aziende di aggiornarsi continuamente, ma spesso diventa insostenibile per la maggior parte di loro, soprattutto per le aziende medio-piccole. Un altro aspetto da considerare è che questi sistemi creano una dipendenza assoluta dalla tecnologia poiché all'interno di queste interazioni, le macchine non rappresentano più solo il braccio che svolge il lavoro pesante, ripetitivo e/o pericoloso, ma giocano sempre più un ruolo decisionale [11]. Particolare attenzione deve essere prestata a queste tecnologie, soprattutto quando sono coinvolte nella sicurezza. In molti casi la tecnologia migliora la sicurezza, ma può anche aggiungere nuovi rischi industriali e occupazionali a quelli tradizionali in cui il fattore umano può essere considerato il principale legame tra entrambi i tipi di rischio [12]. Siemieniuch et al. [13] evidenziano inoltre che la gestione della sicurezza, nel contesto dell'Industria 4.0, richiede maggiori sforzi di ricerca sui fattori umani e sull'ergonomia. In questo contesto, particolare attenzione deve essere data agli stabilimenti disciplinati dalla direttiva Seveso [14], nei quali la fuoriuscita di sostanze pericolose potrebbe causare gravi incidenti, i cosiddetti incidenti rilevanti (cioè, incendi, esplosioni e dispersioni tossiche) che incidono sulle persone e sull'ambiente.

Alcuni studiosi hanno discusso del potenziale dei sistemi intelligenti per migliorare il controllo del rischio di incidenti rilevanti dovuto all'uso di sostanze pericolose in diversi settori industriali (energetico, chimica, manifatturiero, petrolio e gas, trasporti, ecc.) [15]. Alcune soluzioni innovative sono state presentate in letteratura: Bragatto et al. [16] hanno definito una tecnologia RFID che supporta una gestione

efficace del rischio nei magazzini chimici; Ancione et al. [17] hanno sviluppato un sistema di guida visiva in tempo reale per le gru, per gestire i rischi dovuti alle fuoriuscite di sostanze pericolose; Gnoni et al. [18] hanno definito un sistema basato su IoT per prevenire le lesioni nei sistemi di produzione in linea di assemblaggio; Mennuti et al. [19] hanno utilizzato reti di sensori wireless basate su emissioni acustiche per monitorare alcuni danni alle strutture. Recentemente, nell'ambito di un progetto di ricerca recentemente concluso [20], è stato sviluppato un sensore virtuale per elaborare e visualizzare informazioni relative al deterioramento di apparecchiature critiche; inoltre, esso produce stime prognostiche del tasso di corrosione, della probabilità del pit critico, l'evoluzione della corrosione del materiale e la vita utile residua (RUL) dell'attrezzature. Il sensore virtuale supporta le ispezioni sul campo visualizzando le informazioni in realtà aumentata (AR) tramite il display di un dispositivo mobile come smartphone o tablet o tramite dispositivi indossabili (ad esempio smart-glasses). Durante la prima fase di sviluppo di questo sensore virtuale, maggiore importanza è stata data all'ottimizzazione dei processi per l'implementazione dei modelli matematici che utilizzano dati provenienti da input diversi. Più di recente, con questa ricerca, è stata invece condotta un'indagine sull'interazione uomo-macchina nell'uso di questo dispositivo; questo lavoro ha portato a un'interfaccia user-friendly, che ha migliorato l'utilizzabilità del software rendendolo accessibile anche al personale non esperto in tecnologie avanzate.

Lo scopo di questo articolo è presentare l'implementazione del sensore virtuale minimizzando gli errori associati all'interazione uomo-macchina. Il manoscritto è organizzato come segue. La sezione 2 fornisce una breve descrizione dei modelli e del software che rappresentano il sensore virtuale; la sezione 3 descrive la metodologia per lo sviluppo di un'interfaccia utente del sensore virtuale di facile utilizzo, riducendo gli errori dovuti alla HMI; la sezione 4 illustra i risultati, li discute e presenta alcuni suggerimenti per i miglioramenti futuri; infine, la sezione 5 offre le conclusioni del lavoro.

2. Architettura del sistema

Un sensore virtuale per la gestione dell'invecchiamento è uno strumento che supporta gli ispettori nelle strutture a rischio di incidente rilevante. Gli ispettori hanno bisogno di comprendere il livello effettivo di deterioramento dell'attrezzatura critica, acquisire informazioni che non possono essere trovate con una sola ispezione visiva e infine elaborare le metriche legate allo stato di invecchiamento e all'adeguatezza della gestione dell'invecchiamento.

Il sistema qui presentato è stato progettato per raccogliere varie informazioni, elaborare i dati acquisiti, produrre stime prognostiche su: velocità di corrosione, probabilità di pit critico, evoluzione della superficie di corrosione, tempo di vita residuo (RUL) dell'attrezzatura e infine, permette la visualizzazione dei risultati utilizzando la realtà aumentata. Tale sistema è composto da quattro elementi: 1) il dataset, che viene alimentato attraverso la raccolta di informazioni sull'attrezzatura da analizzare; 2) l'insieme dei modelli matematici; 3) il software per la gestione dei

dati e l'elaborazione delle metriche legate all'invecchiamento; 4) lo strumento per la visualizzazione dei risultati in realtà aumentata.

I modelli utilizzati dal sensore virtuale sono:

- il metodo a indici per la stima dell'indice di adeguatezza complessiva (indice di invecchiamento) [21];
- il modello di frequenza di guasto per la quantificazione della frequenza di guasto dovuta al deterioramento dell'attrezzatura tenendo conto della gestione dell'invecchiamento;
- il modello per l'individuazione della probabilità di incisione critica, basato sulla teoria dei valori estremi (modello di distribuzione Gumbel) [22].
- il modello per il calcolo della durata di vita utile residua basato su una combinazione della distribuzione di Gumbel e il teorema di Bayes [23].
- una tecnica avanzata di interpolazione spaziale delle misure di spessore per produrre mappe di corrosione (kriging) [24].

Ulteriori dettagli su questi modelli sono forniti da Ancione et al. 2022 [25]

Il sensore virtuale è composto da un'applicazione desktop che acquisisce ed elabora gli input (informazioni sull'attrezzatura) e un'applicazione mobile per la visualizzazione in realtà aumentata dei dati acquisiti ed elaborati. La visione in AR può essere fruita anche mediante smart-glass connessi all'app mobile.

Le tecnologie utilizzate per lo sviluppo del sensore virtuale sono descritte in Ancione et al. 2022 [25].

3. Interazioni Uomo-Macchina

La Figura 1 mostra il diagramma di flusso dell'interazione tra l'ispettore (utente) e l'applicazione desktop. La linea tratteggiata indica un percorso che può essere omesso nel caso in cui l'utente non voglia elaborare stime future ma visualizzare solo la superficie di corrosione e i parametri relativi alle ispezioni correnti e passate. La Figura 2 illustra l'interazione tra l'ispettore e l'applicazione mobile.

Per utilizzare il sensore virtuale, l'ispettore avvia l'applicazione desktop e inserisce i dati di invecchiamento dell'attrezzatura. Ciò richiede il caricamento dei seguenti file: i datasheet delle ispezioni effettuate utilizzando il modello dell'indice di invecchiamento [21] e i file di testo contenenti le misurazioni dello spessore campionate durante le ispezioni con le relative coordinate spaziali. Infine, l'ispettore può scegliere se elaborare le informazioni relative solo allo stato attuale dell'attrezzatura, al passato o al futuro, cioè, facendo riferimento alle date delle ispezioni precedenti o selezionando da 1 a 5 anni futuri. Egli può anche scegliere di produrre stime delle metriche legate all'invecchiamento (probabilità di formazione di punti critici, RUL, velocità di corrosione, ecc.) e delle superfici di corrosione contemporaneamente.

Successivamente, l'applicazione legge e codifica questi dati, li elabora secondo i modelli implementati, crea grafici e tabelle dei parametri di invecchiamento per un anno selezionato. Una volta completato il processo, l'applicazione archivia

automaticamente i documenti nel percorso definito. Successivamente, l'ispettore può visualizzare le informazioni prodotte per migrarle nell'applicazione mobile o ripristinare i campi dell'interfaccia per effettuare un nuovo inserimento ed eseguire nuove elaborazioni. Dopo aver inserito il nome dell'attrezzatura, l'ispettore può svolgere un'ulteriore operazione mediante l'applicazione desktop, cioè la generazione del QR code da posizionare vicino all'attrezzatura per la sua identificazione, nel caso questa fosse ancora sprovvista di tale codice. L'ultimo passo è rappresentato dall'uscire dall'applicazione desktop e avviare l'applicazione mobile.

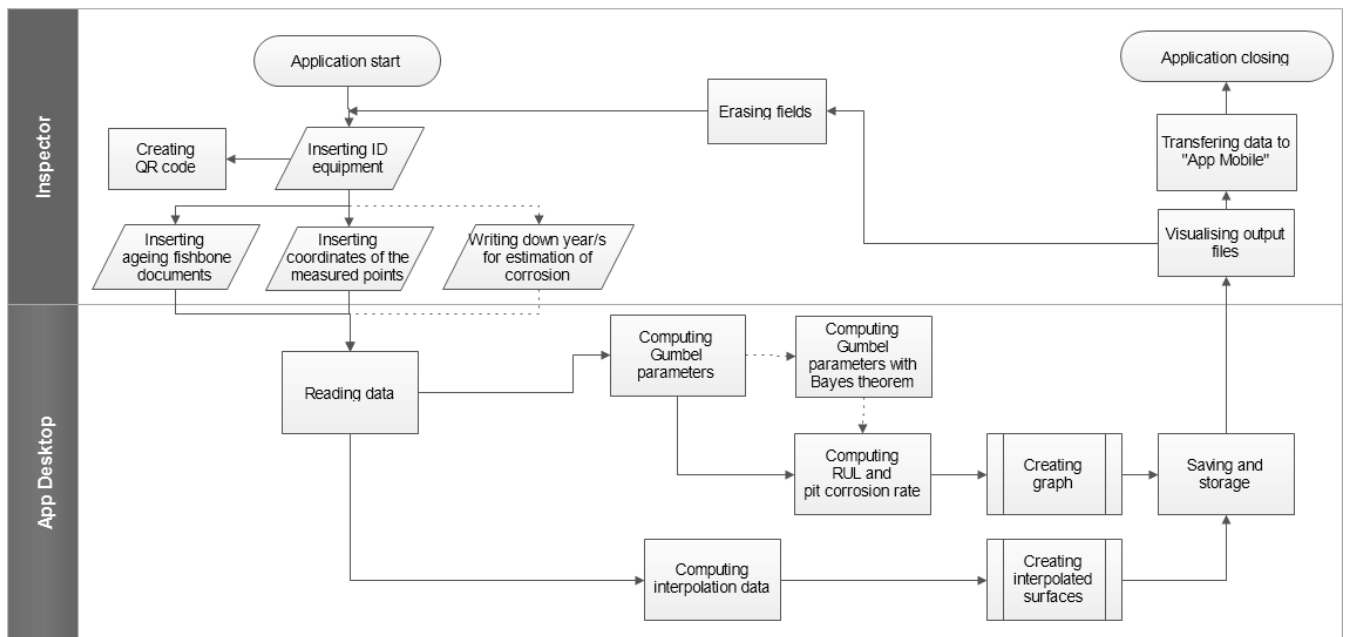


Figura 1. Diagramma di flusso dell'interazione tra l'ispettore e l'app desktop.

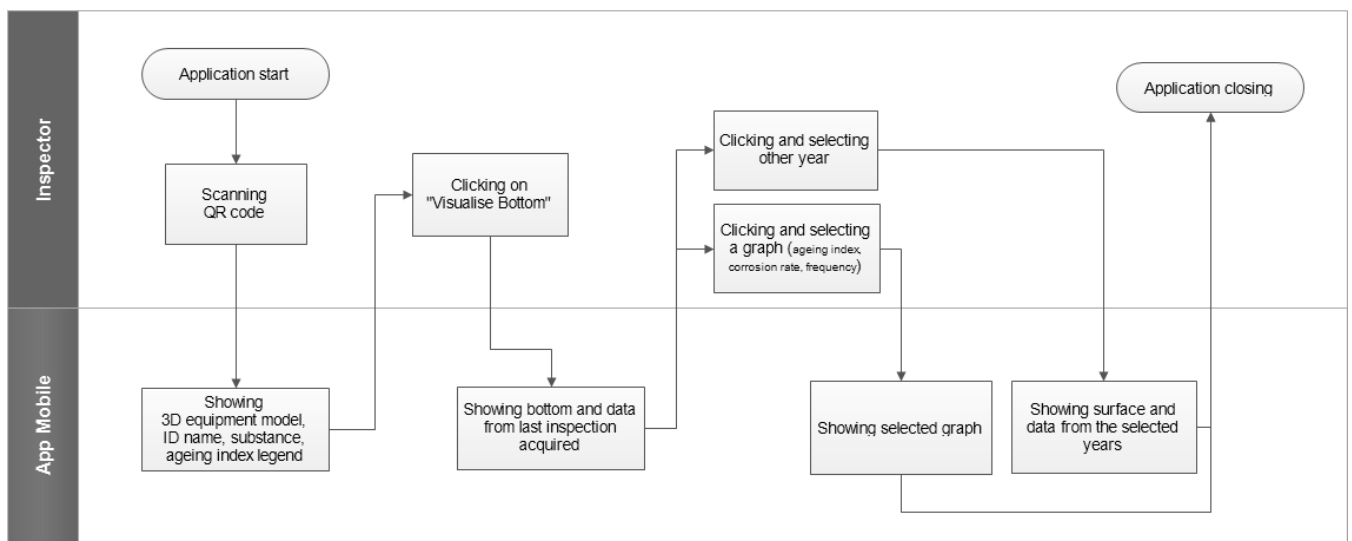


Figura 2. Diagramma di flusso dell'interazione tra l'ispettore e l'app mobile.

4. Risultati

4.1. Caso studio

Per testare il sensore virtuale è stato utilizzato un serbatoio di stoccaggio di idrocarburi a tetto fisso all'interno di un impianto Seveso. Il serbatoio è realizzato in acciaio al carbonio e immagazzina diesel. È in funzione da oltre 55 anni e le lastre del fondo hanno uno spessore nominale di 8 mm. Per tale apparecchiatura, sono stati forniti i dati di due ispezioni del fondo effettuate nel passato: la prima risalente al 1990 e la seconda al 2019. Per tale serbatoio, è stato creato un modello 3D come supporto per la AR ed è stato adattato per sovrapporsi alla miniatura del serbatoio di stoccaggio disponibile nel laboratorio del gruppo TREES-MAT (Tecnologia e Ricerca su Energia, Ambiente e Materiali per la Sicurezza) dell'Università di Messina. È stata quindi effettuata una "passeggiata di sicurezza" al fine di osservare l'interno del serbatoio in AR.

4.2. Identificazione delle criticità nell'Interazione Uomo-Macchina

I test sono stati effettuati da almeno 40 utenti suddivisi in tre gruppi omogenei: gruppo 1 utenti con una solida formazione informatica ma senza esperienza nella sicurezza, gruppo 2 utenti con solo conoscenze sulla sicurezza e sugli impianti chimici, e gruppo 3 utenti con solida esperienza in informatica e sicurezza. I test di usabilità sono stati condotti attraverso una passeggiata di sicurezza in laboratorio e chiedendo ai partecipanti di elencare le criticità emerse durante l'uso del sistema. Le seguenti criticità sono state evidenziate:

- la migrazione dall'app desktop all'app mobile era complessa e possibile solo per esperti di informatica;
- l'app mobile aveva un'interfaccia molto affollata, con spazio limitato per la visualizzazione AR;
- l'uso di un telefono cellulare per dare istruzioni al sensore virtuale distraeva l'utente.

4.3. Interfaccia grafica del sensore virtuale

L'interfaccia grafica del sensore virtuale è stata progettata per essere facilmente utilizzabile. La parte desktop permette di raccogliere i dati di input, processarli e produrre gli output dei risultati (stime delle metriche, grafici e mappe). Mentre, quella dell'app mobile è stata progettata in modo minimalista per lasciare il maggior spazio possibile alla visualizzazione della realtà con il supporto della AR.

Più in dettaglio, l'interfaccia desktop (Figura 3a) consente innanzitutto la creazione di uno spazio dedicato per l'archiviazione dei dati dell'attrezzatura da ispezionare, ovvero una cartella identificata con il nome o il codice dell'attrezzatura. Essa ha una sezione dedicata all'inserimento dei dati storici sull'invecchiamento, come i file fishbone e gli spessori misurati durante ispezioni precedenti. È presente una casella in cui è possibile inserire l'anno (o gli anni) per i quali ci si aspetta di stimare i parametri relativi al deterioramento, oltre a una sezione dedicata ai tasti di calcolo. Mentre quella del dispositivo mobile è decisamente molto più essenziale, essa

possiede solo tre bottoni a schermo (Figura 3b) che permettono la fruibilità dei vari tipi di risultati.

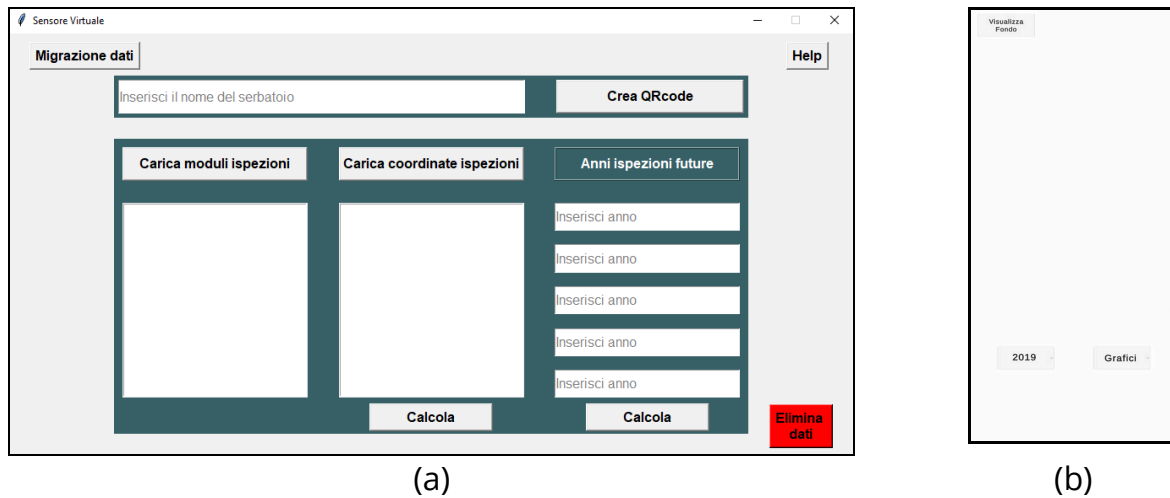


Figura 3. Interfaccia della (a) applicazione desktop e (b) applicazione mobile.

L'app mobile permette la visualizzazione in AR dei risultati, cioè sovra-impressi e ancorati agli elementi reali. Essa consente di riconoscere l'apparecchiatura durante la passeggiata di sicurezza e sovrapporre ad esse le mappe di iso-contorno di corrosione, la tabella contenente i parametri di invecchiamento e le altre informazioni generali dell'apparecchiatura (nome, codice di identificazione, sostanza contenuta, anno di messa in esercizio o ricondizionamento, ecc.). Come già accennato, la sua interfaccia grafica possiede solo tre bottoni che consentono la selezione dell'anno per il quale l'ispettore desidera conoscere le metriche di invecchiamento e la mappa di corrosione, di rendere trasparenti le parti dell'apparecchiatura non analizzate e infine di scegliere il grafico da visualizzare. Tuttavia, l'app mobile, sfrutta anche i sensori del dispositivo mobile (ad es. il sensore di posizione, ecc.) per una esplorazione più fluida e coinvolgente dell'apparecchiatura seguendo il movimento fisico dello stesso ispettore nello spazio. Dopo il miglioramento dell'interfaccia utente grafica, il sensore virtuale è stato ri-testato nuovamente dagli stessi utenti. La fase di migrazione dei dati è stata automatizzata e gli elementi dell'app mobile sono stati ridotti in numero e dimensioni (in base ai suggerimenti ricevuti dagli utenti dopo la prima fase di test). Essi hanno trovato la nuova versione molto facile da usare. Il problema legato all'uso di un dispositivo mobile per dare istruzioni al sensore virtuale non è ancora stato risolto perché ciò richiede l'introduzione di altre tecnologie o un ulteriore miglioramento del software (ad es. il dito sullo schermo del dispositivo mobile dovrebbe lasciare una traccia in modo che l'ispettore, mentre guarda attraverso gli occhiali smart, sia consapevole della posizione del suo dito sullo schermo). Il comando vocale potrebbe essere un altro possibile modo per gestire l'interfaccia grafica. L'uso di registrazioni vocali potrebbe essere un'altra possibile implementazione per raccogliere informazioni utili sul campo. La considerazione

sopra non è un ostacolo all'adozione della tecnologia per lo scopo proposto, ma rappresenta un potenziale sviluppo futuro di questa ricerca.

4.3. Risultati in Realtà Aumentata

La Figura 4 mostra alcune schermate dei risultati ottenuti dal sensore virtuale durante un'ispezione effettuata sul caso studio.

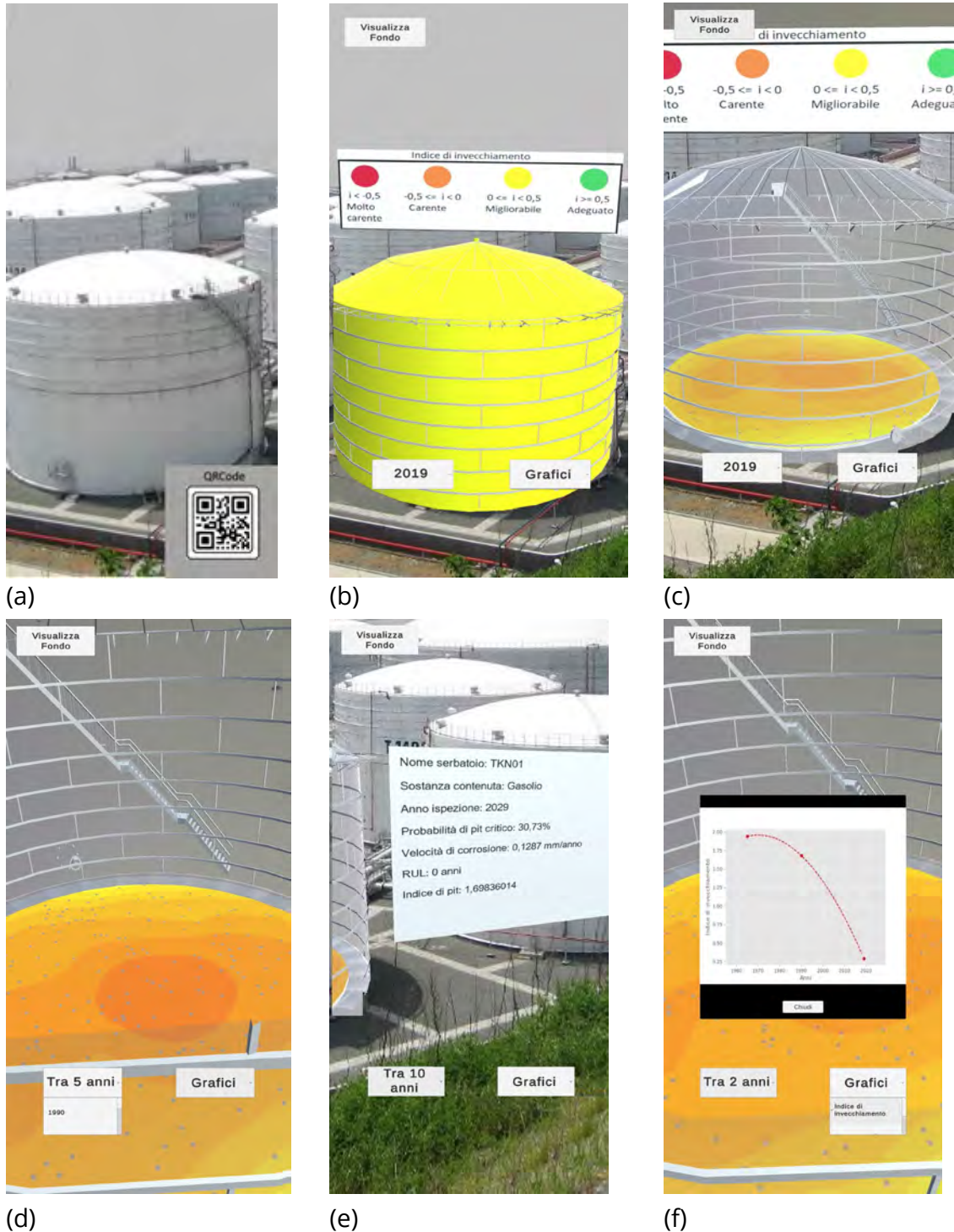


Figura 4. Screenshot del dispositivo mobile che visualizza la realtà aumentata durante una passeggiata di sicurezza simulata nello stabilimento.

La prima operazione da eseguire per utilizzare il sensore virtuale è inquadrare il codice QR dell'apparecchiatura (Figura 4a). Il codice viene posizionato a una certa distanza e ad una certa altezza, a seconda dell'orografia del territorio e della disposizione dell'unità dell'impianto, per consentire all'ispettore di avere una facile visione d'insieme dell'apparecchiatura durante la sua passeggiata di sicurezza all'interno dell'impianto. Il dispositivo riconosce istantaneamente il serbatoio e mostra il suo equivalente modello 3D sul display del dispositivo mobile in realtà aumentata (Figura 4b). Il colore dell'apparecchiatura dipende dallo stato attuale di invecchiamento, ovvero dal valore dell'indice di invecchiamento ottenuto durante l'ultima ispezione; una legenda per identificare questo stato è disponibile in sovrapposizione, sopra il serbatoio. Successivamente, cliccando sul pulsante "Visualizza fondo", in alto nell'interfaccia (Figura 4c), tutte le lastre che compongono la struttura e il tetto del modello 3D diventano trasparenti, anche se la struttura del serbatoio rimane ben visibile; allo stesso tempo, sulla parte inferiore viene sovrapposta una mappa iso-contorno, che rappresenta la superficie di corrosione associata all'ultima ispezione effettuata. Il passaggio successivo è scegliere l'anno (passato o futuro) per il quale deve essere stimata il trend di corrosione del fondo (Figura 4d); ciò può essere scelto tramite un menu a comparsa sul pulsante in basso a sinistra. Per lo stesso anno, le metriche legate all'invecchiamento (il tasso di corrosione, la densità dei punti di corrosione, la RUL, la probabilità di pit critico, l'indice di invecchiamento e il tasso di guasto aggiornato) e altre informazioni generali sull'apparecchiatura (nome del serbatoio e sostanza conservata) vengono visualizzate anche in una tabella posta sul lato destro dell'apparecchiatura (Figura 4e). Infine, l'ultimo passo dell'uso dell'applicazione mobile riguarda la visualizzazione dei grafici che mostrano la tendenza dell'indice di invecchiamento, del tasso di corrosione e della frequenza di guasto rispetto al tempo (anno); ciò può essere realizzato utilizzando un piccolo menu a comparsa sul pulsante "Grafici" in basso a destra dell'interfaccia grafica (Figura 4f).

Per ogni movimento dell'ispettore (ovvero il movimento del dispositivo con la fotocamera), la vista in realtà aumentata viene aggiornata; ad esempio, quando l'ispettore si avvicina all'apparecchiatura, viene effettuato automaticamente un ingrandimento dell'area inquadrata, viceversa, se l'operatore si allontana, si ha la visione di un'area inquadrata più ampia. I punti che possono essere osservati sulle mappe di fondo del serbatoio nella Figura 4f non sono i punti campionati, ma una rappresentazione grafica della densità di corrosione, che aumenta nel tempo a causa del peggioramento del materiale dovuto alla corrosione [25]. Il numero di punti visualizzati è correlato al parametro di scala della funzione di probabilità di distribuzione utilizzata per modellare il fenomeno (si noti che per ogni incremento di 0,1 nel parametro di scala, c'è un aumento di 50 punti distribuiti casualmente sulla mappa).

5. Conclusioni

Il sensore virtuale è uno strumento utile per l'ispettore per accedere alle informazioni necessarie su campo durante le ispezioni. In particolare, l'AR fornisce informazioni sullo stato di integrità delle parti dell'attrezzatura che non possono essere osservate direttamente durante un'ispezione visiva. Inoltre, permette la produzione di metriche prognostiche correlate all'invecchiamento oltre al loro aggiornamento e archiviazione.

Il sistema è stato dotato di una interfaccia user-friendly grazie allo studio dell'interazione uomo-macchina (HMI) che ha supportato il processo di implementazione e ha permesso di migliorare l'usabilità del software rendendolo accessibile anche a personale non esperte di tecnologie avanzate.

Attualmente, il sensore virtuale è progettato per ispezionare serbatoi di stoccaggio molto grandi per la gestione dell'integrità di alcune parti di questo tipo di attrezzatura. In particolare, il fondo del serbatoio non è facile da monitorare, poiché la sua ispezione richiede che il serbatoio venga svuotato e poi pulito per effettuare le misurazioni dello spessore. Queste attività vengono eseguite a intervalli di tempo lunghi per evitare prolungate interruzioni e ripetute esposizione dell'ispettore ad ambienti insalubri. L'uso di questo sistema mira ad estendere l'intervallo di ispezione mediante l'aggiornamento delle condizioni attese.

Il sensore virtuale, quindi, risulta particolarmente significativo nei casi in cui sia difficile interrompere il funzionamento del sistema per monitorare una parte di esso (come nel caso del fondo dei serbatoi).

Il sistema può supportare l'esecuzione delle safety-walk per tutte le apparecchiature incluse nello stabilimento. Tuttavia, ci sono limitazioni associate a diversi tipi di attrezzature, principalmente legate alla geometria e complessità dei sistemi, dove potrebbe essere difficile distinguere una parte dell'attrezzatura dall'altra. La complessità si riferisce a sistemi con pareti multiple o superfici ondulate o con intersezioni complesse, che causano una vista affollata.

Inoltre, l'attuale sperimentazione è stata condotta in laboratorio. Pertanto, in uno stabilimento reale, l'orografia del terreno e le condizioni meteorologiche potrebbero influenzare l'accuratezza ed efficacia dell'uso della tecnologia, si rende quindi necessario testarla in un vero stabilimento (sviluppo futuro del sistema).

La visualizzazione della mappa di corrosione, combinata con la stima della RUL e gli altri parametri legati all'invecchiamento, consente all'ispettore di concentrare l'attenzione sui punti critici quando si trova in campo. L'intero sistema (sensore virtuale) permette di combinare deduzioni visive con previsioni ottenute dai modelli al fine di comprendere l'evoluzione prevista del fenomeno, anche in base a come questo fenomeno viene realmente gestito.

6. Bibliografia

[1] Brettel, M., Friederichsen, N., Keller, M., Rosenberg, M. How virtualization, decentralization and network building change the manufacturing landscape: An Industry 4.0 perspective. *Int. J. Mech. Ind. Sci. En.* 2014, 8, 37–44.

- [2] Liu, Z., Xie, K., Li, L., Chen, Y. A paradigm of safety management in Industry 4.0. *Syst. Res. Behav. Sci.* 2020, 37, 632–654.
- [3] Gisbert, J.R., Palau, C., Uriarte, M., Prieto, G., Palazón, J.A., Esteve, M., Moyano, A. Integrated system for control and monitoring industrial wireless networks for labor risk prevention. *J. Netw. Comput. Appl.* 2014, 39, 233–252.
- [4] Beetz, M., Bartels, G., Albu-Schäffer, A., Bálint-Benczédi, F., Belder, R., Beßler, D., Haddadin, S., Maldonado, A., Mansfeld, N., Wiedemeyer, T., et al. Robotic agents capable of natural and safe physical interaction with human co-workers. In *Proceedings of the 2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Hamburg, Germany, 28 September–2 October 2015. pp. 6528–6535.
- [5] Podgorski, D., Majchrzycka, K., Dąbrowska, A., Gralewicz, G., Okrasa, M. Towards a conceptual framework of OSH risk management in smart working environments based on smart PPE, ambient intelligence and the Internet of Things technologies. *Int. J. Occup. Saf. Ergon.* 2017, 23, 1–20. <https://doi.org/10.1080/10803548.2016.1214431>.
- [6] Zhang, Y. Diagnosis and Detection Method of Critical Equipment Failure Based on Electronic Nose Technology. *Chem. Engineer. Trans.* 2018, 68, 241–246.
- [7] Nadai, N., Melani, A.H.A., Souza, G.F.M., Nabeta, S.I. Equipment failure prediction based on neural network analysis incorporating maintainers inspection findings. In *Proceedings of the Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS)*, Orlando, FL, USA, 23–26 January 2017.
- [8] Liu, R., Yang, B., Zio, E., Chen, X. Intelligenza artificiale per la diagnosi dei guasti delle macchine rotanti: Una revisione. *Sist. Mecc. Ed Elabor. Del Segnale* 2018, 108, 33–47. (In Italian)
- [9] Ersöz, O.Ö., Inal, A.F., Aktepe, A., Türker, A.K., Ersöz, S. A Systematic Literature Review of the Predictive Maintenance from Transportation Systems Aspect. *Sustainability* 2022, 14, 14536.
- [10] Wee, D., Kelly, R., Cattel, J., Breunig, M. *Industry 4.0-How to Navigate Digitization of the Manufacturing Sector*. McKinsey & Company: Munich, Germany, 2015. p. 58.
- [11] Carra, S., Monica, L., Vignali, G. Decision Making Approaches for Safety Purposes in Working Environments with Human-Technology Interaction. In *Proceedings of the 31st European Safety and Reliability Conference*, Angers, France, 19–23 September 2021.
- [12] Brocal, F., González, C., Komljenovic, D., Katina, P.F., Miguel, A., Sebastián, M.A. Emerging risk management in Industry 4.0: An approach to improve organizational and human performance in the complex systems. *Complex. Manuf. Process Syst.* 2019, 2019, 2089763.
- [13] Siemieniuch, C.E., Sinclair, M.A., Henshaw, M.D. Global drivers, sustainable manufacturing and systems ergonomics. *Appl. Ergon.* 2015, 51, 104–119.

- [14] EU Council. Directive 2012/18/EU on the control of major-accident hazards involving dangerous substances. Off. J. Eur. Union 2012, L197, 1–37.
- [15] Ansaldi, S.M., Agnello, P., Bragatto, P.A. Smart safety systems: Are they ready to control the hazard of major accidents? WIT Trans. Built Environ. 2018, 174, 169–180.
- [16] Bragatto, P.A., Pirone, A., Gnoni, M.G. Application of RFID technology for supporting effective risk management in chemical warehouses. In Safety, Reliability and Risk Analysis: Beyond the Horizon. Taylor & Francis Group: London, UK, 2014.
- [17] Ancione, G., Kavasidis, I., Merlino, G., Milazzo, M.F. Real-time guidance system for cranes to manage risks due to releases of hazardous materials. In Risk, Reliability and Safety: Innovating Theory and Practice. Taylor & Francis Group, London, UK, 2017.
- [18] Gnoni, M.G., Elia, V., Bragatto, P.A. An IOT based system to prevent injuries in assembly line production systems. In Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM), Bali, Indonesia, 4–7 December 2016. pp. 1889–1892.
- [19] Mennuti, C., Augugliaro, G., De Petris, C., Cardarilli, G., Di Nunzio, L., Fazzolari, R. Tecniche per la localizzazione di danni strutturali per mezzo di AE: Algoritmi e possibili soluzioni HW per WSN. In Proceedings of the SAFAP Conference, Milan, Italy, 15–6 November 2016. (In Italian)
- [20] Arena, F., Collotta, M., Pau, G., Termine, F. An Overview of Augmented Reality. Computers 2022, 11, 28.
- [21] Ministero dell’Ambiente e della Sicurezza Energetica. Valutazione Sintetica Dell’adeguatezza del Programma di Gestione dell’Invecchiamento Delle Attrezzature Negli Stabilimenti Seveso. Available online: <https://www.mase.gov.it/notizie/valutazione-sintetica-dell-adeguatezza-del-programma-di-gestione-dell-invecchiamento-delle> (accessed on 17 April 2023).
- [22] Gumbel, E.J. Statistical Theory of Extreme Values and Some Practical Applications. US Department of Commerce, National Bureau of Standards. Appl. Math. Ser. 1954, 33, 1–51.
- [23] Milazzo, M.F., Ancione, G., Bragatto, P., Mennuti, C. Simplified modelling of the remaining useful lifetime of atmospheric storage tanks in major hazard establishments. Chem. Engineer. Trans. 2020, 82, 175–180.
- [24] Ancione, G., Bragatto, P., Milazzo, M.F. Visualization of the Bottom Deterioration of Atmospheric Storage Tanks by Combining Prediction and Interpolation Models. Chem. Eng. Trans. 2022, 91, 271–276.
- [25] Ancione, G., Saitta, R., Bragatto, P., Fiumara, G., Milazzo, M.F. An Advanced System for the Visualisation and Prediction of Equipment Ageing. Sustainability 2022, 14, 6156.

Monitoraggio e controllo dei rischi legati all'invecchiamento dei liner anticor in PEAD rinforzati con fibre aramidiche, utilizzati nelle applicazioni di relining delle sea lines

D. Di Fonzo¹, V. Bartolozzi², G. Augugliaro³, G. Vaccaro¹, R. Lena⁴

¹Inail - Uot di Palermo

²ARPA Sicilia, Dipartimento Attività Produttive e Impatto sul Territorio

³Inail - Dit

⁴SONATRACH Raffineria Italiana S.r.l.

Abstract

I principali utilizzi di *piping* in *PEAD* riguardano il trasporto del gas naturale, la costruzione di condotte civili, l'industria chimica, petrolchimica, nucleare, alimentare, il settore energetico e le tubazioni di processo. Nelle applicazioni specifiche di *relining* delle *sea lines* mediante l'utilizzo di tubazioni in PEAD rinforzato, non più ispezionabili con tecnologia *Pig Inspection*, si applicano di consuetudine strategie di controllo basate su parziali ispezioni visive e sull'eccessivo affidamento ai test idraulici. Tali sono le metodologie manutentive del tipo "*Run to failure*" per le quali il componente resta in servizio fino al suo cedimento strutturale, per essere successivamente sostituito. Obiettivo del presente lavoro è quello di proporre in ottica predittiva e in sede progettuale di tali *lining anticor* utilizzati nei depositi costieri per il trasporto carburanti via mare, definiti "critici" dal Gestore ai sensi del D.Lgs. 105/15, tecniche integrative di monitoraggio e diagnostica attiva dello stato strutturale, per meglio gestire anticipatamente potenziali eventi anomali. Mediante l'ausilio di sensori multifunzione, trasmettitori di campo, comunicanti con la sala controllo parametri o via smart, possono adottarsi in tal modo, strategie di manutenzione del tipo "*Condition based maintenance*" sostituendo le componenti strutturali critiche, non al raggiungimento del collasso della sezione resistente, ma in base alle loro effettive condizioni di esercizio.

Keywords: relining, piping, structural health monitoring, phased array, lining.

1. Caratteristiche strutturali del PEAD

Il polietilene (PE) ad alta densità (PEAD o HDPE dall'inglese *high-density polyethylene*), è un polimero termoplastico semicristallino sintetizzato ricavato da prodotti ottenuti dalla distillazione (*cracking*) del petrolio, e composto essenzialmente da carbonio e idrogeno. La struttura chimica del monomero etilene è costituita da due atomi di carbonio connessi da un doppio legame: la sua formula è indicata come $-CH_2=CH_2-$. Nel caso specifico del polietilene, aggiungendo fra di loro i monomeri, il legame

doppio fra atomi delle stesse unità si trasforma in legame singolo fra atomi di unità differenti, dando vita al polimero, il polietilene (Fig. 1).

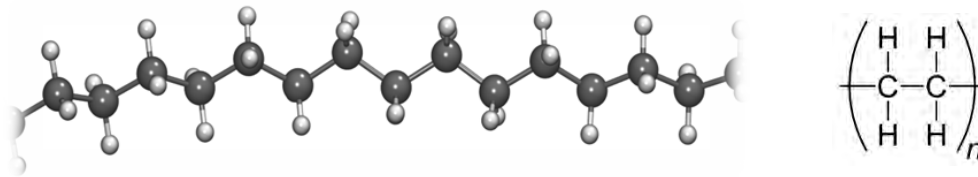


Figura 1. Rappresentazione grafica e formula chimica del polietilene

La quantità delle ramificazioni, contribuisce significativamente alla qualità del prodotto finale: ad esempio, nel caso in cui le catene polimeriche si sovrappongono le une sulle altre senza una presenza significativa di ramificazioni, si ottiene il polietilene ad alta densità (HDPE o PEAD), materiale rigido e con un peso specifico pari a $0,95 \text{ g/cm}^3$, nel caso siano presenti grandi in quantità di ramificazioni rispetto alla propagazione lineare della catena di atomi di carbonio, il materiale risultante è il polietilene a bassa densità (LDPE), duttile.

2. Caratteristiche fisiche e comportamento meccanico del PEAD

Come in generale gli altri polimeri termoplastici, per via della sua struttura omogenea il PEAD ha un comportamento meccanico isotropo, esibendo proprietà meccaniche e termiche uguali in tutte le direzioni (Tab. 1).

In particolare, le caratteristiche meccaniche del PEAD dipendono dalla:

- velocità di deformazione,
- temperatura,
- natura dell'ambiente (presenza di acqua, ossigeno, solventi organici, ecc.).

Resiste a diversi solventi, ha una resistenza alla trazione e modulo di Young (coefficiente di rigidità) più bassa dei polimeri termoindurenti, tollera molto bene gli impatti e presenta più elevati valori di resilienza.

| CARATTERISTICHE MECCANICHE | VALORE | CARATTERISTICHE TERMICHE | VALORE |
|--------------------------------------|-----------------------|--|------------------------------------|
| Densità | 0.95 g/cm^3 | Punto di fusione | $130 \text{ }^\circ\text{C}$ |
| Tensione di snervamento | 25 MPa | Max temperatura d'impiego pe tempi brevi | $90 \text{ }^\circ\text{C}$ |
| Allungamento allo snervamento | 10 % | Max temperatura d'impiego per tempi lunghi | $75 \text{ }^\circ\text{C}$ |
| Allungamento alla rottura | > 600 % | Min temperatura d'impiego | $-200 \text{ }^\circ\text{C}$ |
| Modulo di elasticità | 1000 MPa | Temperatura di rammollimento | $80 \text{ }^\circ\text{C}$ |
| Resistenza alla flessione | 24 MPa | Coefficiente di dilatazione termica lineare | $1.8 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ |
| Durezza con sfera Rockwell | 46 | Resistenza alle intemperie | Media |
| Carico ammissibile a compressione | 22 MPa | Infiammabilità | Infiammabile |

Tabella 1. Caratteristiche meccaniche e termiche

3. Aspetti impiantistici

Le matrici polimeriche rinforzate con fibre e/o *filler* granulari, grazie alle loro proprietà intrinseche e meccaniche, costituiscono oggi valide alternative alle tubazioni in materiale tradizionale metallico, in svariati settori industriali e persino negli impianti nucleari. Presentano un peso ridotto, resistenza meccanica e alla corrosione da sostanze acide H_2SO_4 , e caustiche NaOH (tensocorrosione), elevato rapporto resistenza/peso, lunga durata, impermeabilità, facilità di posa. di lavorazione, basti costi di manutenzione. L'elevata resistenza alla propagazione lenta della frattura (*Slow Crack Growth*) ne misura la capacità di resistere a intagli e carichi concentrati, e l'elevata resistenza allo scorrimento plastico. Effettuando prove idrostatiche a rottura e per non meno di 9000 ore, estrapolando le curve di misura, si può determinare l'indice di invecchiamento del materiale, pensato come il carico dovuto alla pressione interna che causerebbe la rottura duttile del tubo dopo 50 anni (*Minimun Required Strength* a 20 °C, MRS). Per i diversi tipi di tubi in polietilene ad alta e media densità e per diverse temperature (20 °C, 40 °C, 60 °C, 80 °C) si determinano le curve di regressione da cui si desumono i parametri di progetto. Il valore del carico σ di progetto per il calcolo dello spessore del tubo è pari all'MRS di riferimento ridotto di un coefficiente di sicurezza di 1,25 (acqua) e 3,25 (gas). A temperature maggiori di 20 °C le curve sono più basse e presentano un ginocchio ancor prima dei 50 anni di servizio, che indica il cambiamento nel comportamento meccanico del PEAD. Un esempio significativo d'impiego sono i *liner anticor* in tubi in materiale metallico (*Relining*). Nel campo della distribuzione di gas metano e del convogliamento di GPL, l'idoneità dei tubi all'impiego è garantita dalla conformità al DM del 24/11/84 "Norme di sicurezza antincendio per il trasporto, la distribuzione, l'accumulo e l'utilizzazione del gas naturale con densità non superiore a 0,8" e successivi aggiornamenti fino al Decreto 16 aprile 2008. In base ai decreti citati, le tubazioni in polietilene sono così classificate:

- condotte di 1^a specie: pressione massima di esercizio MOP > 24 bar;
- **condotte di 2^a specie: 12 bar < MOP ≤ 24 bar**
- condotte di 3^a specie: 5 bar < MOP ≤ 12 bar
- condotte di 4^a specie: 1,5 bar < MOP ≤ 5 bar
- condotte di 5^a specie: 0,5 bar < MOP ≤ 1,5 bar
- condotte di 6^a specie: 0,04 bar < MOP ≤ 0,5 bar
- condotte di 7^a specie: MOP ≤ 0,04 bar.

Analogamente a quanto previsto per le tubazioni metalliche costruite in accordo con la direttiva PED 2014/68/UE, in merito all'impiego di tubazioni in PEAD aventi DN>80, contenenti fluidi del Gruppo 1 e classificate nella I, II, e III categoria, oppure contenenti fluidi del Gruppo 2 e classificate nella III categoria, dette attrezzature risultano soggette alle riqualificazioni periodiche di cui al D.M. 329/04. Le tubazioni contenenti fluidi del Gruppo 2 e classificate nella I e II categoria, sono invece esenti dalla riqualificazione periodica ai sensi dell'art. 11 del medesimo decreto (Tab. 2).

| FLUIDI | LIQUIDI | GAS |
|----------|--|--|
| GRUPPO 1 | soggette a verifica se DN>80 (I,II,III Cat.) | soggette a verifica se DN>80 (I,II,III Cat.) |
| GRUPPO 2 | soggette a verifica se di III Categoria | soggette a verifica se DNxP>5000 (III Cat.) |

Tabella 2. Caratteristiche delle tubazioni soggette ad ispezione periodica

Le condotte comprendenti tubazioni per il trasporto di fluidi da o verso un impianto, in mare aperto o sulla terra ferma, sono escluse dal campo di applicazione della Direttiva PED 2014/68/UE, dalle verifiche obbligatorie di messa in servizio e di riqualificazione periodica di cui al D.M. 329/04. Resta comunque onere del Gestore/Utilizzatore, responsabile della politica generale per la sicurezza, e destinatario di quanto previsto all'art. 71, comma 8 del Decreto Legislativo n. 81/08, valutare il permanere delle condizioni di sicurezza relative al corretto utilizzo delle attrezzature e degli impianti. Nel caso di tubazioni interne ai confini dello stabilimento, ritenute critiche ai sensi della normativa Seveso e, quindi, soggette a procedure che rientrano nel Sistema di Gestione della sicurezza, il Gestore è tenuto, oltre a garantire il loro utilizzo in condizioni sicure, a monitorare e controllare i rischi legati all'invecchiamento.

4. Utilizzo dei liner anticor in Pead con rinforzo in Kevlar nelle applicazioni di relining delle sealines

I depositi costieri di prodotti petroliferi mediante l'ausilio di tubazioni metalliche (oleodotti) protetti con un *coating* interno in vernice epossidica, si riforniscono via mare (benzina, gasolio, jet fuel, olio minerale), per mezzo di navi petroliere a centralina di comando computerizzata, che possono essere ormeggiate per lo scarico dei prodotti in un pontile o in un campo boe (distante mediamente 1 Km dalla costa). Gli oleodotti *off-shore* (generalmente aventi un diametro DN250 - 10"), per buona parte della loro lunghezza (circa 900 m) risultano essere adagiati sul fondo marino a una profondità di circa 15 m, la cui superficie esterna risulta essere protetta da uno strato di conglomerato cementizio. La parte terminale dell'oleodotto è costituita da una manichetta flottante flessibile avente vita utile di 10 anni (sottoposta a test annuali di controllo), collegata con una cima a un gavitello, che in occasione di ogni scarica, viene flangiata al *manifold* della nave cisterna. Il rimanente sviluppo della linea, è costituito generalmente da un tratto *on-shore* con sbocco fuori terra all'interno del deposito costiero. Le navi vengono di norma ormeggiate solo nelle ore diurne mentre le operazioni di scarico e disormeggio possono effettuarsi anche la notte. Gli oleodotti a fine scarica vengono invasati di acqua dolce preventivamente inviata dal deposito alla nave. Le operazioni di scarico dei prodotti petroliferi possono così sintetizzarsi:

- invio acqua dolce dal deposito alla nave;

- inizio scarico prodotti (benzina a 5 bar, gasolio a 7 bar) dalla nave al deposito con portata media di 600 m³/h e massima velocità del fluido di 3 m/s;
- invio acqua dolce dalla nave al deposito, mantenendo le tubazioni piene d'acqua durante il periodo di inattività.

5. Controlli non Distruttivi eseguiti sulle sea lines in materiale metallico

Nei casi in cui effettuati i CnD **quinquennali** sulla linea in **acciaio al carbonio** mediante l'ausilio della tecnologia *Pig Inspection*, al fine di rilevare eventuali difetti, variazioni di spessori, variazioni di rugosità, ovalizzazioni o corrosioni interne, si riscontra una diminuzione della sezione resistente, un metodo economico per bloccare l'avanzamento del fenomeno corrosivo, consiste nell'inserimento interno alla linea (*Relining*) di una tubazione in polietilene termoplastico rinforzato (*lining*) multistrato a spessore ridotto, che conferisce flessibilità e resistenza estremamente elevate. Il non consentito utilizzo della tecnologia *Pig* nelle condotte in PEAD è un consueto limite imposto dal fabbricante al fine di evitare eventuali danneggiamenti della superficie interna.

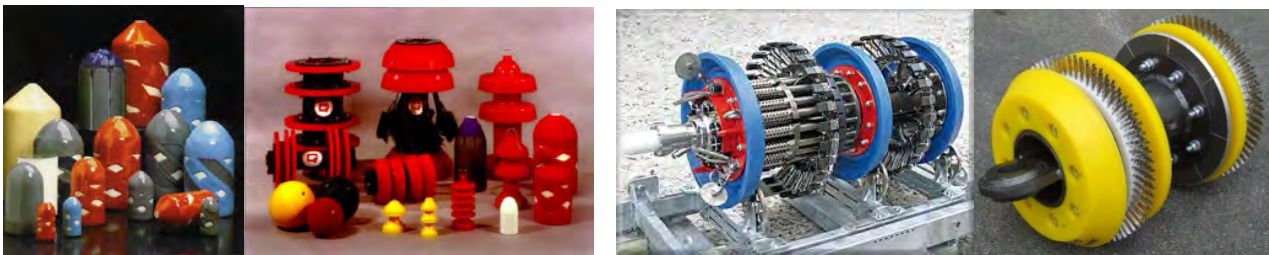


Figura 2. cleaning pig - caliper pig - gauging pig (fonte: web)

6. Specifiche di progetto e qualifica dei lining in PEAD rinforzato

Le specifiche di produzione e qualifica del *lining* per applicazioni petrolifere sono soggette allo standard industriale API-15S i cui parametri principali in termini di prestazioni idrauliche per *lining* DN250/10 inch sono:

- LCL (*lower confidence level*) pressione idrostatica a lungo termine calcolata mediante curva di regressione (Lo standard industriale API-15S si basa su un periodo di servizio di 175000 ore o 20 anni di vita utile)
- MPR (*maximum pressure rating*) massima pressione idrostatica che può essere applicata continuamente con un alto grado di certezza che non si verificherà alcun guasto = $LCL F_D = LCL 0,67$ (con F_D fattore di progettazione)
- NPR (*normal pressure rating*) pressione idrostatica nominale definita dal produttore $\leq MPR$
- MOP (*maximum operating pressure*) Pressione massima di esercizio) = $NPR F_S = NPR 0,8 = 19,9$ bar (con F_S fattore funzione del fluido idrocarburo)

tenuto conto di ulteriori fattori di riduzione:

- K_B = massima curvatura 30°
- K_T = temperatura di esercizio ≥ 20 °C

- p_{GEO} = prevalenza idraulica = 20 m = 2 bar

si ottiene la massima pressione di esercizio consentita per il *lining* in PEAD:

- **MAOP** (*maximum allowable operating pressure*) = $MOP K_B K_T - p_{GEO} = 13,2 \text{ bar}$

Tuttavia, prima del raggiungimento dei 20 anni di vita utile, al fine di conoscere con maggior dettaglio lo stato di invecchiamento e la vita utile residua del *lining*, il costruttore consiglia di eseguire su alcune sezioni del tubo prove meccaniche di laboratorio (rottura, durezza, deformazione).

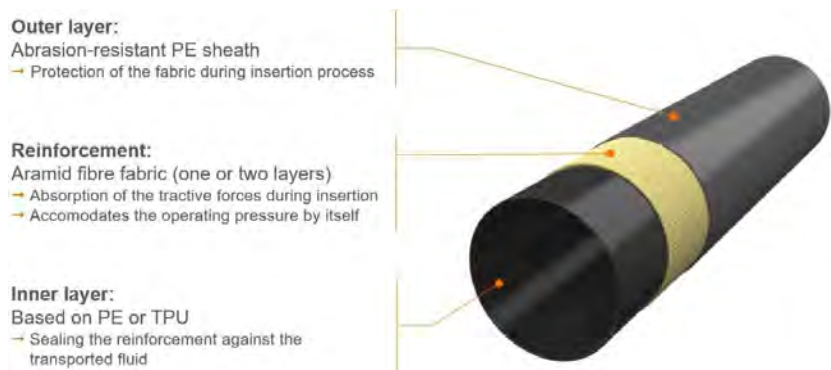
7. Parti strutturali costituenti i *lining* in PEAD rinforzato

La sezione del *lining* utilizzato risulta costituita da:

- uno strato interno in poliuretano termoplastico TPU compatibile con il gasolio, posto a sigillo e protezione del rinforzo in Kevlar,
- un tessuto intermedio di rinforzo (sezione resistente del *lining*) in fibra aramidica (Kevlar) demandato alla resistenza alle sollecitazioni longitudinali di trazione (generate durante la fase di *relining*) e alle sollecitazioni circonferenziali di trazione (generate dalla pressione interna),
- da uno strato esterno in polietilene PE resistente all'abrasione, posto a protezione del tessuto in Kevlar durante il processo di *relining*.

Figura 3. componenti strutturali di una condotta in PEAD rinforzata con tessuto aramidico

(fonte: Liner integrity management – Primus Line 230041)



Per installazioni all'interno di tubi DN250/10-inch si utilizzano *lining* da 9.3" tenuto conto della compatibilità con il fluido di esercizio (benzina, gasolio, ecc.), della compatibilità con l'acqua dolce e salata, nonché con la pressione massima di esercizio MAOP della pipeline. Si noti nel diagramma σ - ϵ come il Kevlar seppur avendo un modulo elastico $E = 130.000 \text{ MPa}$ inferiore alle fibre in Carbonio $E = (228.000 \div 517.000 \text{ MPa})$ possiede una tenacità molto superiore riuscendo a immagazzinare una energia durante la deformazione, 2, 3 volte superiore alle fibre in C. La tenacità, che corrisponde all'area sottesa dalla curva σ - ϵ il cui significato fisico è quello di una densità energetica J/m^3 immagazzinata nel materiale, misura la resistenza offerta all'avanzamento della frattura, ovvero la

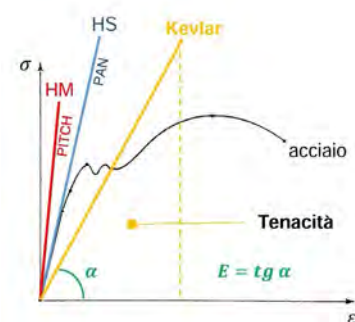


Figura 4. diagramma σ - ϵ relativo a rinforzi in c, k, acciaio

capacità della struttura ad assorbire energia, deformandosi plasticamente prima di arrivare alla rottura.

8. Test di compatibilità e invecchiamento chimico con il gasolio e benzina

Dal *lining* in PEAD per applicazioni petrolifere da 9,3 inch idoneo per installazioni di *relining* di condotte da 10 inch (DN250) in accordo allo standard API-15S sono state eseguite le prove meccaniche di laboratorio nelle seguenti condizioni:

- ✓ Numero di provini: 60 aventi dimensioni in accordo alla norma DIN EN ISO 57-2
- ✓ Mezzo di prova per la *sea line* B: Diesel, Temperatura di conservazione: 40 °C
- ✓ Pressione di conservazione in autoclave: 7 bar (pressione di scarico gasolio dalla nave al deposito)
- ✓ Tempo di campionamento: 24, 100, 200, 500, 1000, 2000, 3000, 5000, 8000, 10000h
- ✓ Dopo campionamento: determinazione della variazione di massa (g), volume (cm^3), resistenza a trazione (MP_a), deformazione (%) in accordo alla norma DIN EN ISO 527-2
- ✓ Ambiente di prova: condizioni standard (23 ± 2 °C), ($50\% \pm 10$ di umid. rel.) in accordo alla norma DIN EN ISO 291 class 2

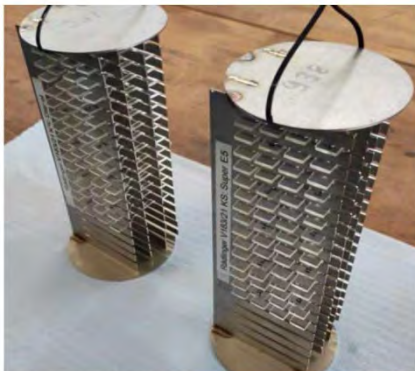


Figura 5. provini campione sottoposti a pressurizzazione in autoclave.

(fonte: Liner integrity management – Primus Line 230041)

La tensione di rottura sui provini immersi nel gasolio ha superato in alcuni casi il 18% di quella della resina allo stato naturale, mentre la deformazione e la durezza discostano solo di qualche punto percentuale. Non è risultata invece soddisfatta la compatibilità del *lining* con la benzina, avendosi riscontrato una tensione di rottura sui provini, pari a circa la metà di quella dichiarata sulla resina allo stato naturale. Anche la durezza e la deformazione sono state riscontrate più basse del 9% e 5÷11%.

9. Verifica dello stato d'integrità del liner in PEAD rinforzato

Sul tratto fuori terra della *sea line* utilizzata per il trasporto gasolio, sottoposta a *relining*, è stato installato un simulacro (*by pass* di circa 2 m) con all'interno lo stesso tipo di *lining* collocato sulla linea. Questo particolare pezzo campione, ubicato sullo stesso circuito della linea e pertanto operante alle medesime condizioni operative di pressione, temperatura e fluido, viene **annualmente** disassemblato e ispezionato visivamente, sia internamente che esternamente, al fine di verificare l'assenza di vesciche o crepe e il buono stato di integrità.



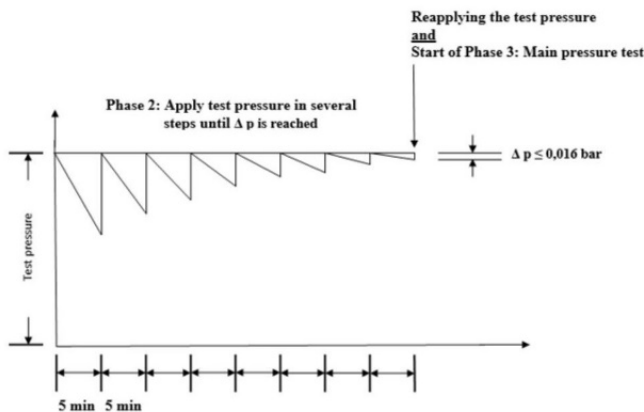
Figura 6. Difetti visibili, vesciche, crepe. Liner interno.
(fonte: Liner integrity management - Primus Line 230041)



Figura 7. Ispezione visiva interna ed esterna del pezzo campione disassemblato, costituito con stesso *lining* protettivo installato nella *sea line*
(fonte: Liner integrity management - Primus Line 230041)

10. Test di prova idraulica

Sul lining da 9,3 inch installato all'interno alla tubazione DN 250/10 inch, avente una massima pressione di esercizio consentita MAOP (*maximum allowable operating pressure*) = $MOP K_B K_T - p_{GEO} = 13,2$ bar secondo lo standard industriale tedesco DIN EN 805, si esegue una prova di tenuta idraulica annuale alla pressione di 1,5 $P_{scarico\ gasolio} = 1,5 \times 7$ bar = **10,5 bar**. Il test di prova idraulica ha inizio quando dopo 5 minuti di attesa dal termine della pressurizzazione, si ha una caduta di pressione massima di 0,016 bar, e si intende superata in modo soddisfacente, se durante il



tempo minimo di 2h si ha una caduta di pressione massima di 0,4 bar. Come ulteriore misura per preservare l'integrità del liner in PEAD e della tubazione metallica, nelle condizioni di riposo (tubo non in fase di scarico gasolio), si pressurizza a 0,2 bar lo spazio anulare lining-tubo e dentro il *lining* si mantiene una pressione interna di 2 bar.

Figura 8. Grafico del test di prova di tenuta idraulica.
(fonte: Liner integrity management - Primus Line 230041)

11. Sistema di protezione catodica a corrente impressa

Gli oleodotti per la ricezione dei prodotti sono protetti contro i fenomeni di corrosione di natura elettrochimica, da un sistema di protezione catodica, il cui dispersore anodico costituito da un filo continuo in titanio contenuto dentro una calza riempita con carbone calcinato. La verifica della funzionalità, affidata al controllo della tensione di rete, tensione e corrente di alimentazione, differenza di potenziale, è semestrale. Ogni cinque anni le verifiche e i controlli sono effettuate più approfonditamente.

12. Metodologie di controllo, rilievi e riscontri

Nello caso specifico delle operazioni di *relining* mediante l'ausilio di tubazioni in PE rinforzate, la mancanza di specifiche procedure di ispezione e criteri di accettabilità dei difetti, causa spesso strategie di controllo basate essenzialmente su parziali ispezioni visive di natura soggettiva (mancanza di confronto con immagini appropriate) e sull'eccessivo affidamento ai test idraulici, che rappresentano sostanzialmente una strategia di manutenzione del tipo **Run-to-failure**: il componente rimane in servizio fino al suo cedimento strutturale per essere successivamente sostituito. Metodologia manutentiva per anni utilizzata in Italia sulle infrastrutture. Nel caso invece di strategia di manutenzione del tipo **Time-based-maintenance**: le componenti critiche vengono rimpiazzate dopo un periodo di tempo stabilito a priori, indipendentemente dallo stato del componente. Tipica strategia di manutenzione e controllo dell'industria automobilistica e aeronautica.

13. Proposte di tecniche supplementari di monitoraggio e diagnostica dell'integrità strutturale

Le suddette procedure di controllo e manutenzione, valutate nel caso specifico di tubazioni installate in ambienti soggetti a ispezioni del SGS possono essere ulteriormente integrate con l'adozione in sede progettuale di specifici metodi di CnD *off-line* e/o metodi *on-line* di monitoraggio dello stato strutturale SHM - *Structural Health Monitoring*, sufficienti a garantire il buon funzionamento e migliorare la corretta valutazione dello stato di invecchiamento.

I sistemi operativi gestiti da remoto consentono il monitoraggio e l'analisi dei dati attraverso controlli digitali che connettono la strumentazione in campo (sensori, trasduttori, trasmettitori) al personale operativo di presidio in sala controllo parametri o in *mobile connectivity*, consentendo la gestione anticipata di potenziali eventi anomali.

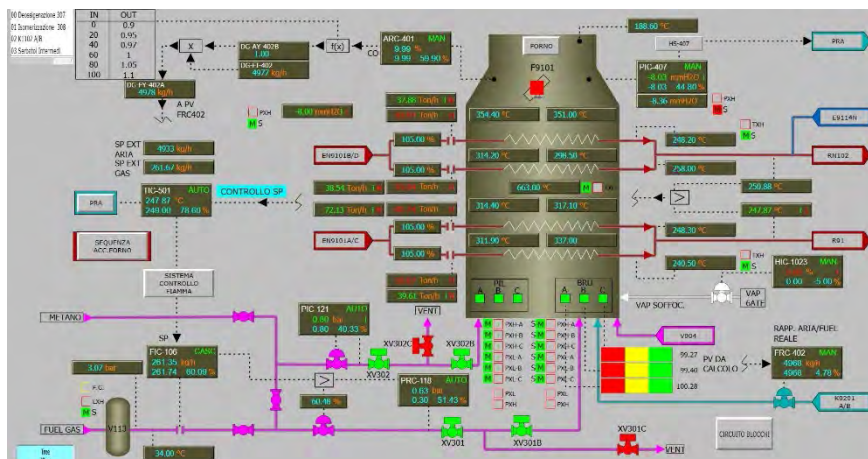


Figura 9. Monitoraggio on line in sala controllo parametri dei dati operativi di un forno di una raffineria

Oggi sono disponibili *smartphone* antideflagranti in grado di fornire attraverso sofisticati *software*, le variabili di processo (temperature, flussi, pressioni), disegni, database, procedure, controlli ecc. Proprio attraverso l'utilizzo di dedicate reti di monitoraggio integrate ad algoritmi probabilistici avanzati, si può intervenire in modo predittivo sulla gestione della sicurezza strutturale. E' inoltre opportuno applicare metodologie di controllo e monitoraggio eterogenee (tecniche diverse di rilevamento e misurazione del degrado strutturale, discontinuità, perdite o trafileamenti) e sinergiche, utilizzando strategie manutentive del tipo **Condition-based-maintenance**, sostituendo le componenti strutturali in base alle loro effettive condizioni di esercizio. In tal caso deve esserci un sistema che consente di monitorare la struttura in generale e le singole componenti. Per il rilevamento e la caratterizzazione dei danneggiamenti ci si può avvalere in particolare di dedicate metodologie di analisi e registrazione dei dati, concepite per essere applicate *on-line* - durante il servizio, monitorando la struttura in modo permanente (*real-time*) oppure su richiesta (*on-demand*). In quest'ottica di manutenzione predittiva si colloca la strategia del controllo attivo (*active control*) e del monitoraggio dello stato strutturale *SHM*.

14. I principali CnD utilizzabili per il monitoraggio delle tubazioni PEAD

Sulle tubazioni in polietilene ad alta densità e sulle plastiche in generale, i principali CnD *in-service* possono essere classificati come di contatto o senza contatto. Le tecniche di contatto includono i test ultrasonici volumetrici PAUT (*Phased Array Ultrasonic Testing*) mediante l'ausilio *PIG* assemblati ad *hoc*, aventi in dotazione scanner flessibili con sonde a bassa frequenza (0,25; 1; 2,25 MHz) per minimizzare i fenomeni di attenuazione tipici dei materiali compositi, soddisfacendo nel contempo sia requisiti di natura economica che ergonomica. Altri CnD di contatto sono i liquidi penetranti (PT), il *Coin Tapping*, l'Emissione Acustica (EA) mentre le tecniche senza contatto includono l'Esame Visivo (EV) diretto e remoto, la Radiografia (RT), la Termografia a infrarossi, l'Olografia, la Shearografia.

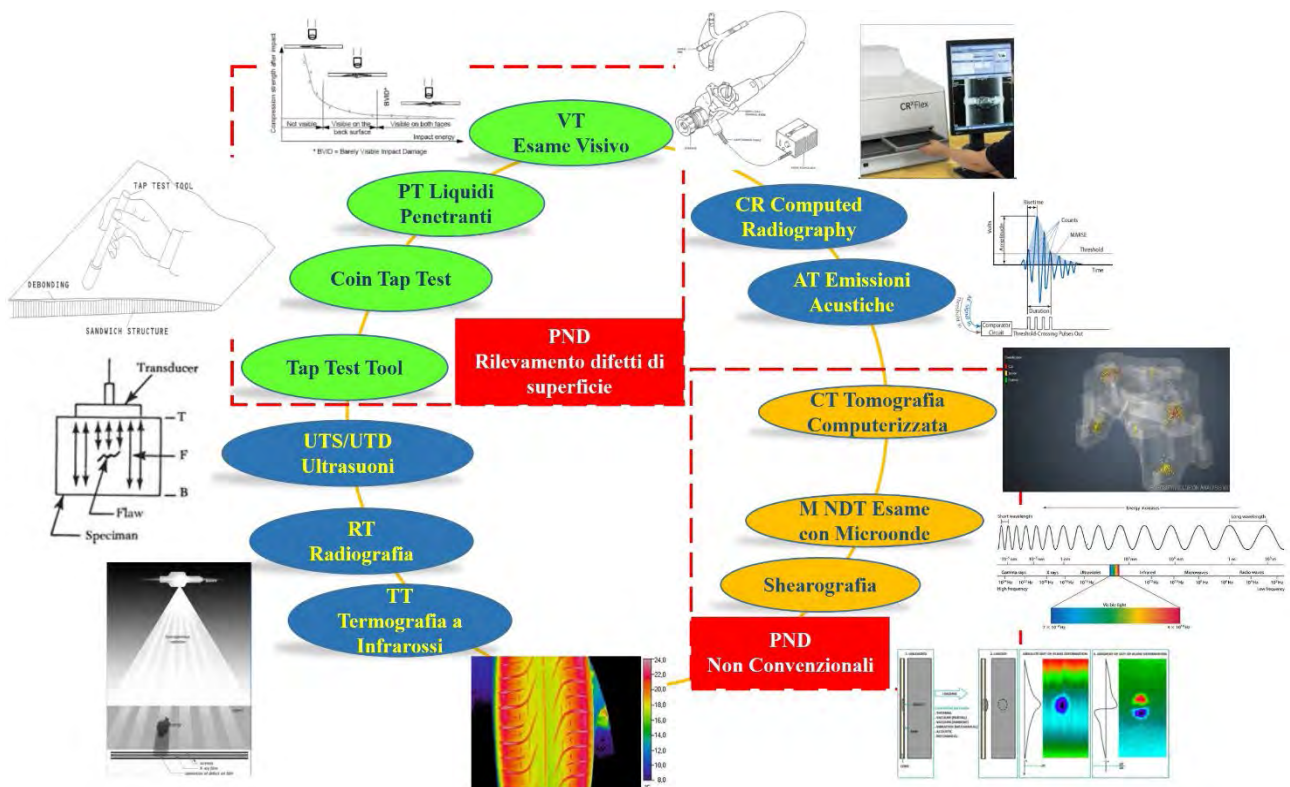


Figura 1. Le principali tecniche di PnD applicabili per il monitoraggio delle fasi di produzione e/o dello stato di invecchiamento

Bibliografia

- [1] W.D. Callister Jr., David G. Rethwisch - Materials Science and Engineering: An Introduction, Enhanced eText, John Wiley & Sons 9th Edition, dic. 2013.
- [2] ASTM F2164 – 21: Standard Practice for Field Leak Testing of Polyethylene (PE) and Crosslinked Polyethylene (PEX) Pressure Piping Systems Using Hydrostatic Pressure.
- [3] In Line Inspection - Ispezione interna di condutture attraverso il metodo del pigging. Autori: G. Vaccaro, G. Argento, D. Di Fonzo. SAFAP 2016, Milano 15/16 novembre 2016.
- [4] Impiego delle tubazioni in polietilene ad alta densità (PEAD) nel settore delle attrezzature a pressione. Autori: D. Di Fonzo, G. Vaccaro, G. Gorrino, E. Pichini Maini. SAFAP 2018, Bologna 28/29 novembre 2018.
- [5] Requisiti di Damage Tolerance e Durability per la riparabilità delle attrezzature a pressione in materiale composito avanzato a matrice polimerica (*Polymer Matrix Composites, PMCs*). Procedure operative sulle riparazioni strutturali. Autori: D. Di Fonzo, C. Mennuti, E. Pichini Maini, G. Vaccaro. SAFAP 2021, Roma 16, 17 e 18 novembre 2021.
- [6] Tecniche operative di riparazioni cosmetiche per il ripristino dell'estetica originale e per il mantenimento della stabilità strutturale di attrezzature di lavoro in materiale

composito avanzato. Le principali metodologie di prove non distruttive applicabili. Autori: D. Di Fonzo, G. Vaccaro, C. Mennuti, E. Pichini Maini. AIPnD 2022, Verona 19, 20 e 21 ottobre 2022.

[7] Liner integrity management – Primus Line – 230041 ESSO/SONATRACH – Palermo, Italy. Documento Nr. PL-FB-MA-027-EM. Data 09.05.2021

[8] Manuale Tecnico PE GAS – Dalmine resine. Gennaio 2010

Principali riferimenti di legge e normativi

[9] DM 24/11/84 “Norme di sicurezza antincendio per il trasporto, la distribuzione, l'accumulo e l'utilizzazione del gas naturale con densità non superiore a 0,8” e s.m.i.

[10] Decreto 16 aprile 2008 “Regola tecnica per la progettazione, costruzione, collaudo, esercizio e sorveglianza delle opere e dei sistemi di distribuzione e di linee dirette del gas naturale con densità non superiore a 0,8”

[11] DM 1/12/2004, n. 329 “Regolamento recante norme per la messa in servizio ed utilizzazione delle attrezzature a pressione e degli insiemi di cui all'art. 19 del D.Lgs. 25/02/00, n. 93

[12] Direttiva 2014/68/UE (97/23/CE) recepita con D.Lgs. 15/02/16, n. 26 (PED)

[13] D.Lgs. 26/06/15, n. 105 (Attuazione della direttiva Seveso III 2012/18/UE relativa al controllo del pericolo di incidenti rilevanti connessi con sostanze pericolose)

[14] Serie UNI EN 1555: Generalità, Tubi, Raccordi, Valvole, Idoneità all'impiego del sistema

[15] UNI CEN/TS1555-7:2013 – Guida per la valutazione della conformità

[16] UNI 10520:2009 Saldatura ad elementi termici per contatto – Saldatura di giunti testa a testa di tubi e/o raccordi in polietilene per il trasporto di gas combustibili, di acqua e di altri fluidi in pressione.

[17] UNI 10521:2012 saldatura per elettrofusione – Saldatura di tubi e/o raccordi in polietilene per il trasporto di gas combustibili, di acqua e di altri fluidi in pressione.

Piano di monitoraggio e controllo dei rischi legati all'invecchiamento di apparecchiature e impianti negli stabilimenti Seveso

M. R. Vallerotonda¹, A. Andolina², E. Artenio¹, E. Bemporad¹, M. Borino³, D. Di Fonzo⁴, V. Galasso⁵, M. F. Milazzo⁶, F. Moncini⁷, F. Palombo⁸, A. Pirone¹, T. Vairo⁹, F. Vazzana¹⁰, C. Delle Site¹

¹Inail - Dit

²Inail - Uot di Milano

³CNVVF

⁴Inail - Uot di Palermo

⁵Inail - Uot di Taranto

⁶Università di Messina

⁷Inail - Uot di Torino

⁸Inail - Uot di Firenze

⁹Asl Liguria

¹⁰Ispra

Abstract

In attuazione di quanto richiesto negli allegati 3 e B del d.lgs. 105/2015, in azienda deve essere predisposto un piano di monitoraggio e controllo (PMC) delle apparecchiature ed impianti che possono portare alla perdita di contenimento di sostanze pericolose. Il PMC si caratterizza come uno strumento trasversale per il gestore e per le Autorità di controllo durante le attività di verifica sia del Sistema di Gestione che del Rapporto di Sicurezza; tramite il piano il gestore effettua il controllo dello stato delle apparecchiature soggetto a fenomeni correlati con il rischio invecchiamento e valuta come e se implementare azioni migliorative, mentre le Commissioni ispettive hanno un rapido riscontro circa l'appropriatezza e l'efficacia di quanto operato sulla gestione sicura delle attrezzature.

Il presente studio propone un format per la predisposizione del PMC negli stabilimenti soggetti al d.lgs. 105/2015. Lo strumento si pone ad integrazione del processo avviato in ambito di Coordinamento ex art. 11 del d.lgs. 105/2015 per la valutazione del rischio invecchiamento e trova la sua principale applicazione laddove sia stata adottata al riguardo la metodologia descritta nella revisione n. 2 delle linee guida "Valutazione sintetica dell'adeguatezza del programma di gestione dell'invecchiamento delle attrezzature negli stabilimenti Seveso". Lo strumento risulta, comunque, applicabile anche se il gestore abbia adottato altre tecniche e metodologie per la gestione del rischio invecchiamento. Il PMC, inoltre, consente di

effettuare un'autovalutazione dell'efficacia delle strategie utilizzate. L'articolo è corredato dell'applicazione del PMC a due casi pratici.

Keywords: pericolo di incidente rilevante, invecchiamento attrezzature, piano di monitoraggio e controllo, attrezzature critiche.

1. Introduzione

Il d.lgs. 105/2015, di recepimento della Direttiva 2012/18/UE sul controllo del pericolo di incidenti rilevanti connessi con sostanze pericolose, ha introdotto l'obbligo per il gestore di uno stabilimento di effettuare la valutazione del rischio invecchiamento di apparecchiature e impianti. Nello specifico, l'allegato 3 del decreto relativo al sistema di gestione della sicurezza e all'organizzazione dello stabilimento ai fini della prevenzione degli incidenti, nell'ambito del controllo operativo, prevede che il gestore adotti ed applichi procedure ed istruzioni che consentano il monitoraggio ed il controllo dei rischi legati all'invecchiamento delle attrezzature installate nello stabilimento. Nell'allegato B del decreto, al paragrafo 3.4.4, si specifica, inoltre, che il gestore deve prevedere "piani di monitoraggio e controllo dei rischi legati all'invecchiamento di apparecchiature ed impianti che possono portare alla perdita di contenimento di sostanze pericolose, comprese le necessarie misure correttive e preventive". A tal riguardo il gestore deve rilevare e monitorare eventuali fenomeni correlati al rischio di invecchiamento, quali corrosione, erosione, fatica, scorrimento viscoso (ove applicabili) che nel tempo potrebbero portare a modifiche fino alla manifestazione di rilasci. La predisposizione di questo specifico piano di monitoraggio e controllo (PMC) si configura come una pianificazione dei controlli al fine di effettuare un'autovalutazione dello stato delle apparecchiature critiche presenti nello stabilimento, mantenendo ed aggiornando nel tempo i dati e le informazioni raccolti. Le risultanze del PMC potrebbero, ad esempio, evidenziare la necessità di aggiornare le frequenze di guasto utilizzate nell'analisi di rischio ed essere funzionali ad assicurare il buono stato di conservazione e l'efficienza ai fini della sicurezza delle attrezzature di lavoro, come richiesto dal comma 8 dell'articolo 71 del d.lgs. 81/2008 Testo Unico sulla Salute e Sicurezza sul Lavoro, coordinato con il d.lgs. 106/2009.

La verifica della presenza di un PMC è richiesta nel corso delle ispezioni svolte ai sensi dell'articolo 27 del 105/15 per la verifica dell'adeguatezza del sistema di gestione della sicurezza. A supporto dei gestori per l'assolvimento dell'obbligo e delle commissioni ispettive, è stata predisposta nel 2018, in ambito di Coordinamento per l'uniforme applicazione del decreto sul territorio nazionale, una linea guida per una valutazione sintetica del rischio invecchiamento (di seguito linea guida invecchiamento [1]), successivamente revisionata nel 2021 sia per estendere il campo di applicazione ai sistemi rotanti sia per fornire risposta ad aspetti applicativi emersi nel corso del primo utilizzo della metodologia. Come è noto, la linea guida è

uno strumento operativo, disponibile sul sito del Mase (Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica), non obbligatorio per i gestori; in alternativa, i gestori, infatti, devono definire e dare evidenza del metodo adottato per la valutazione del rischio invecchiamento.

Ad oggi, l'utilizzo della metodologia specificata nelle suddette linee guida risulta diffuso da parte dei gestori, ma si deve prendere atto del fatto che al fine di rispondere a quanto richiesto dall'allegato B, è necessaria la predisposizione del PMC che, nel corso delle ispezioni, si riscontra essere il più delle volte non disponibile.

È indubbio che la richiesta di evidenza di un PMC da parte della Commissione ispettiva vada considerata al pari di tutte le altre (si pensi al piano di informazione, formazione, addestramento ed al piano della manutenzione, solo per fare degli esempi) e, pertanto, deve essere predisposto dal gestore e presentato in occasione della verifica dello specifico punto previsto dalla lista di riscontro utilizzata nel corso delle ispezioni.

2. Manutenzione, ispezione e controllo delle apparecchiature

Dal punto di vista impiantistico, il fenomeno dell'invecchiamento non è necessariamente connesso all'età dell'apparecchiatura, ovvero al tempo trascorso dalla data di fabbricazione, di collaudo o di messa in servizio, bensì, all'eventuale deterioramento/danneggiamento fisico nel tempo riconducibile ad eventuali meccanismi di degrado dei materiali. L'invecchiamento si manifesta come una forma di deterioramento generale con un conseguente scadimento delle proprietà chimico-fisiche e meccaniche che tendono a ridurre, fino a compromettere, la funzionalità, disponibilità, affidabilità e sicurezza delle apparecchiature stesse.

A livello operativo, il gestore predispone ed attua attività di manutenzione, ispezione e controllo sulle apparecchiature sulla base di leggi e/o norme tecniche. La stessa manutenzione è considerata parte integrante del sistema di gestione e si basa, ad oggi, su un approccio per lo più predittivo basato sul monitoraggio dei componenti degli impianti, sull'utilizzo di strumenti di analisi di guasto e di stima dell'affidabilità e sul controllo dei dati e dei risultati delle attività svolte.

Nel settore del controllo del pericolo di incidente rilevante oggetto di attenzione sono i "sistemi tecnici critici" così come definiti nell'allegato H, paragrafo 1, lettera i) del d.lgs. 105/2015. Ai fini della gestione dell'invecchiamento vanno, comunque, considerati tutti i sistemi di contenimento (recipienti e linee, in pressione e non), che sono suscettibili degli stessi meccanismi di deterioramento di cui alle normative tecniche settoriali e che in esercizio possono contenere sostanze pericolose in quantitativi sufficienti a determinare un incidente rilevante.

Partendo dai risultati delle attività di ispezione e controllo, il PMC consente di definire la condizione dei sistemi tecnici critici e, attraverso la registrazione dei dati, seguirne nel tempo l'evoluzione. A tal fine, le informazioni di interesse per il

monitoraggio possono essere raccolte e gestite, preferibilmente in formato digitale, secondo le modalità previste nelle specifiche procedure del SGS.

Il gestore può adottare standard internazionali o la linea guida invecchiamento per definire la condizione dei sistemi critici individuati e i potenziali rischi legati al loro stato.

Nel secondo caso, la linea guida consente di definire l'indice finale di propensione all'invecchiamento sulla base del quale rilevare l'adeguatezza o meno delle attività svolte dal gestore anche con l'ausilio della tabella riportata all'Appendice A della linea guida.

In particolare, se l'indice finale risulta negativo, il gestore deve implementare misure di mitigazione (tecniche e/o procedurali) per far sì che i rischi legati all'invecchiamento siano adeguatamente gestiti e/o ridotti. A conclusione dell'applicazione della linea guida, laddove già non sia svolta, sarebbe proficuo effettuare una lettura critica dei fattori frenanti ed acceleranti calcolati con particolare attenzione di quelli che hanno maggiormente inciso sul valore dell'indice finale; ciò consentirebbe di individuare azioni migliorative da adottare per un miglioramento mirato. In quest'ottica, ne consegue che una valutazione critica dell'indice finale auspicabile anche se il suo valore risultasse positivo.

Lo stesso approccio volto al miglioramento continuo dovrebbe essere adottato indipendentemente dalla metodologia di valutazione del rischio invecchiamento che il gestore ha ritenuto di adottare.

Il sistema di gestione risulterà correttamente implementato ed attuato se l'intero processo ne diventa parte integrante: valutazione dei risultati, monitoraggio nel tempo degli stessi, definizione di azioni di miglioramento da discutere nella riunione di riesame al fine di definire obiettivi specifici della Politica di prevenzione degli incidenti rilevanti e relativo inserimento nel piano di miglioramento.

3. Scopo

L'obiettivo del presente lavoro è quello di presentare un format per la predisposizione del PMC negli stabilimenti soggetti al d.lgs. 105/2015.

Lo strumento rappresenta una prima proposta per rispondere a quanto richiesto dall'allegato B del sopra menzionato decreto; può essere utilizzato dai gestori che, ai fini della valutazione del rischio invecchiamento, hanno adottato la linea guida invecchiamento tenendo conto degli esiti dell'applicazione del metodo ovvero di altra e dimostrata metodologia.

Nel format dovranno essere specificati i principi, i documenti di riferimento e le informazioni di cui tenere conto per la predisposizione di un PMC che dia un riscontro, in termini di informazioni e modalità di analisi, di quanto attuato in stabilimento e, laddove siano già messe in atto altre tecniche e metodologie per la gestione dell'asset integrity, fornisce un metodo di autovalutazione dell'efficacia delle strategie utilizzate.

4. Metodologia

Nel presente paragrafo, dopo aver inquadrato la gestione del ciclo di vita lavorativa di un'attrezzatura, viene presentato il format di PMC e dei suoi casi applicativi.

4.1 Gestione della vita lavorativa di un sistema critico

Il ciclo lavorativo delle attrezzature è descritto nelle procedure del SGS-PIR, dalla fase di ordine a quella del decommissioning. Per ciascuna fase, infatti, il gestore individua tutte le azioni da effettuare al fine di garantire in ciascuna di esse la sicurezza di coloro che utilizzano l'attrezzatura anche attraverso attività di controllo/ispezione che ne mantengano la disponibilità e affidabilità nel tempo e, quindi, l'utilizzo sicuro. La tabella 1 riporta in sintesi tali operazioni suddivise per fasi.

| Fase di controllo/ ispezione | Modalità di controllo/ispezione | Responsabilità di funzione | Note |
|---|--|---|--|
| 1. Contratto d'ordine/progetto | <ul style="list-style-type: none"> • Scelta di materiali, rating, tipologia di prodotto • Redazione dell'ordine di acquisto • Verifica conformità dell'offerta • Prove presso il fabbricante • Controllo della documentazione di costruzione • Verifica di accettabilità con l'analisi preliminare | <ul style="list-style-type: none"> • Ufficio acquisti • Manutenzione • Gestore • RSPP • RSGS | |
| 2. Installazione | <ul style="list-style-type: none"> • Corretta messa in servizio • Prove in bianco • Prove di performance | <ul style="list-style-type: none"> • Manutenzione • Gestore • RSPP • RSGS | Redazione della scheda macchina |
| 3. Esercizio | <ul style="list-style-type: none"> • Istruzioni operative • Formazione del personale/addestramento • Bonifiche | <ul style="list-style-type: none"> • Manutenzione • Gestore • RSPP • RSGS • Ditte terze | |
| 4. Manutenzione: a- controllo documentale b- progettazione di tempi e modi di | <ul style="list-style-type: none"> • Istruzioni del fabbricante • Istruzioni operative • Buona tecnica • Reperibilità ricambi • Qualifiche del personale | <ul style="list-style-type: none"> • Manutenzione • Gestore • RSPP • RSGS | -Redazione del piano di manutenzione -Analisi degli indici di prestazione nella |

| | | | |
|--|--|--|---|
| ispezione c- definizione dei parametri di controllo/indici di prestazione d- valutazione dell'invecchiamento | <ul style="list-style-type: none"> • Tempi di intervento/fermo macchina • Fermo impianto/ridondanze | | riunione del riesame -Stima dell'invecchiamento del sistema e margini di miglioramento |
| 5. Cambio d'uso | <ul style="list-style-type: none"> • Dismissione • Spostamento di impianto/nuove condizioni di utilizzo • Fuori uso/rifiuto | <ul style="list-style-type: none"> • Gestore • RSPP • RSGS • Gestione rifiuti • Aggiornamento documentale | |

Tabella 1. Schema della vita lavorativa di un sistema critico.

La FASE 4 è quella di maggiore interesse ai fini del presente lavoro nella quale, sulla base di ciascuna realtà aziendale, il gestore definisce tempi e modi di ispezione e controllo dei sistemi critici.

4.2 Il piano di monitoraggio e controllo

In termini generali il piano di monitoraggio e controllo è finalizzato e consente di:

- raccogliere i dati nell'ambito delle verifiche e controlli svolti;
- dare riscontro dell'oggettivo livello di sicurezza (PIR) correlato allo stato di conservazione delle attrezzature ed impianti oggetto del monitoraggio;
- individuare eventuali impatti negativi non prevedibili e/o difficilmente rilevabili durante il monitoraggio;
- assicurare l'accertamento dell'adempimento a prescrizioni espresse in precedenti ispezioni SGS-PIR o in ambito di istruttoria del Rapporto di sicurezza;
- fornire informazioni per l'analisi degli andamenti nel tempo dei fenomeni che caratterizzano l'esercizio;
- raccogliere specifiche informazioni ai fini della pianificazione degli interventi di manutenzione e della valutazione dell'ulteriore esercizio dell'attrezzatura monitorata;
- valutare l'opportunità di implementare il piano di manutenzione nei tempi, nei modi e nelle procedure.

La Tabella 2, elaborata a titolo esemplificativo, potrebbe in sintesi e in modo operativo rappresentare il piano di monitoraggio con le attività che il gestore prevede/decide (in totale libertà) di implementare sulla base delle condizioni riscontrate delle attrezzature. Infatti, il gestore, per ogni attrezzatura critica individuata e che versa in una condizione non soddisfacente, riporta informazioni legate allo stato della stessa e ai controlli/indagini che ritiene necessario effettuare

per monitorarne l'integrità strutturale e/o la condizione di eventuale degrado/danneggiamento.

| Attrezzatura critica | Criticità | Modalità di danno | Tipo di controllo | Periodicità | Percentuale di stensione | Riferimenti | Note |
|-----------------------------|------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------|---------------------------------|--------------------|-------------|
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |

Tabella 2. Esempio di piano di monitoraggio.

Nella colonna "*Attrezzatura critica*" vengono inserite le attrezzature critiche individuate dal gestore ai fini del controllo operativo.

Nella colonna "*Criticità*" sarà indicato l'aspetto critico rilevato per ciascuna attrezzatura e nella adiacente colonna "*Modalità di danno*" andrà specificato l'eventuale manifestazione della stessa.

Con il termine controllo si vuole intendere il complesso delle azioni adottate dal gestore al fine di valutare o verificare il valore di un parametro, la sua variazione nel tempo e la corretta registrazione dei risultati nel tempo di vita del sistema critico. Tali attività, a seconda della norma tecnica presa a riferimento, possono comprendere sopralluoghi, misurazioni e campionamenti e mirano a rilevare il buono stato di macchine, attrezzature e strumenti attraverso:

- ispezione visiva interna/esterna;
- prove e/o misure rilievi dimensionali;
- prove distruttive e non distruttive;
- prove di laboratorio (analisi chimiche, esami metallografici, ecc.);
- prova di resistenza e tenuta (prova idraulica /pneumatica);
- prove funzionali di accessori di sicurezza, di monitoraggio o di controllo;
- prove di funzionamento delle attrezzature o delle macchine.

Pertanto, nella colonna denominata "*Tipo di controllo*" occorre inserire la tecnica di controllo da attuare sulla base degli esiti ottenuti dalla valutazione preliminare del rischio relativa alla criticità riscontrata. Nelle colonne successive saranno dettagliati il "*Tipo di controllo*" e per ciascuno di essi andrà definita la "*Periodicità*" e l'eventuale "*Percentuale di estensione*". Per tali attività si dovrà tenere conto sia della normativa tecnica di riferimento che dei riscontri che il gestore ottiene dai controlli effettuati (approccio risk based inspection). Questi ultimi aspetti devono essere specificati nella specifica colonna "*Riferimenti*". È stata inserita alla fine anche la colonna "*Note*" nella quale il gestore può riportare informazioni generali, il richiamo a documenti interni come procedure, piani, verbali di controllo, ecc. ovvero quanto ritiene utile inserire per meglio dettagliare le precedenti informazioni con le quali ha compilato il piano.

Il PMC sarà aggiornato almeno in occasione delle ispezioni ai sensi dell'articolo 27 del d.lgs. 105/2015, in caso di incidenti/quasi incidenti che coinvolgono l'attrezzatura

critica, in occasione della revisione/aggiornamento del rapporto di sicurezza, nel caso di modifiche con aggravio di rischio (laddove queste coinvolgano attrezzature critiche sotto monitoraggio), e dell'evoluzione della normativa tecnica di riferimento. La valutazione del rischio invecchiamento e la predisposizione del piano saranno descritti in un'apposita procedura; infatti, il format, qualora adottato, rappresenterà un documento del sistema di gestione e, come tale, sarà opportunamente richiamato nella procedura di riferimento.

4.3 Esempi pratici di utilizzo

Come già specificato nel paragrafo 2, oggetto di valutazione del rischio invecchiamento sono le attrezzature critiche così come definite nell'allegato H, punto 1, i) del d.lgs. 105/201. Ad esemplificazione di quanto sopra, sono presentati due casi applicativi.

4.3.1 PMC di un serbatoio atmosferico

Nel primo esempio è stato considerato un sistema critico standard, ossia, un serbatoio atmosferico che contiene una sostanza pericolosa; tale attrezzatura potrebbe essere sede/causa di un rilascio (e quindi dare vita ad un top ritenuto credibile dal gestore) a causa della sua condizione di esercizio.

Tale serbatoio potrebbe avere un piano di monitoraggio e controllo elaborato a titolo esemplificativo come riportato nella Tabella 3 in cui è considerato evento possibile il suo collasso con sversamento a causa della presenza di punti di corrosione.

| Attrezzatura critica | Criticità | Modalità di danno | Tipo di controllo | Periodicità | Estensione | Riferimenti | Note |
|-----------------------|--------------------------|-------------------|--|-------------|------------|------------------------------|-------------------|
| Serbatoio atmosferico | Collasso con sversamento | Corrosione | Ispezione visiva perdite | Giornaliera | n.a. | Norma di settore | Check list |
| | | | Controllo livello visivo | Settimanale | n.a. | Buone prassi | Check list |
| | | | Controllo strumenti | Ogni turno | n.a. | Procedura interna | Check list |
| | | | Controllo spessori | Triennale | 100% | Manuale d'uso e manutenzione | Rapporto di prova |
| | | | Ispezione linee di adduzione al serbatoio | Settimanale | n.a. | | Check list |
| | | | Controllo integrità bacino di contenimento | Giornaliero | n.a. | | Check list |

Tabella 3. PMC – caso serbatoio atmosferico.

4.3.2 PMC di una pompa centrifuga

Tra le macchine rotanti la più utilizzata e diffusa è la pompa centrifuga che, per caratteristiche di funzionamento, viene monitorata seguendo le indicazioni del fabbricante, ma più generalmente applicando le buone prassi aziendali.

In questo caso, si riporta un esempio di come il gestore può scegliere una pompa con un determinato rateo di guasto che ritiene accettabile e calcolato come riportato nella Tabella 4.

| Sistema critico | Frequenza di rottura secondo codice: OGP Risk Assessment Data Directory Report n° 434-1, March 2010 – Process Release Frequencies | | | | |
|-----------------|--|------------|--|-----------------------------------|---|
| | Pompa centrifuga | N.ro pompe | N.ro ore di funzionamento/h per ogni pompa | Rateo di guasto significativo (R) | Rateo di guasto cumulato di una pompa R x N.ro ore/8760 |
| | 30 | 3000 | $2,7 \cdot 10^{-3}$ | $9,2 \cdot 10^{-4}$ | $30 \times 9,2 \cdot 10^{-4} = 2,76 \cdot 10^{-2}$ |

Tabella 4. Calcolo guasto per rottura accettabile.

La Tabella 5 descrive in sintesi le attività svolte in azienda per ciascuna fase di vita che in genere si svolgono per le pompe centrifughe e le azioni da attuare (compresa quella che siano acquistate solo quelle con un rateo di guasto $2,7 \times 10^{-3}$):

| Fase di controllo/ ispezione | Modalità di controllo/ispezione | Azione | Note |
|--------------------------------|--|---|---------------------------------|
| 1. Contratto d'ordine/progetto | <ul style="list-style-type: none"> • Scelta di materiali, rating, tipologia di prodotto • Redazione dell'ordine di acquisto • Verifica conformità dell'offerta • Prove presso il fabbricante • Controllo della documentazione di costruzione • Verifica di accettabilità con l'analisi preliminare | <ul style="list-style-type: none"> • Corpo in acciaio multistadio • Fornire caratteristica curva di pot.za NPSH • Multifluido gruppo 1 • Motore ATEX • Rateo di guasto $< 2,7 \cdot 10^{-3}$ | |
| 2. Installazione | <ul style="list-style-type: none"> • Corretta messa in servizio • Prove in bianco • Prove di performance | Messa in opera soggetto competente Verifica allineamento Prove P Q sotto battente | Redazione della scheda macchina |

| | | | |
|--|--|---|---|
| 3. Esercizio | <ul style="list-style-type: none"> Istruzioni operative Formazione del personale/addestramento bonifiche | | |
| 4. Manutenzione: a - Controllo documentale b - Progettazione di tempi e modi di ispezione c - Definizione dei parametri di controllo/indici di prestazione d - Valutazione dell'invecchiamento | <ul style="list-style-type: none"> Istruzioni del fabbricante Istruzioni operative Buona tecnica (CCPS Mechanical Integrity) Reperibilità ricambi Qualifiche del personale Tempi di intervento/fermo macchina Fermo impianto/ridondanze | <p>Istruzione operativa 01.01.2023</p> <p>Consumabili: 1 settimana Deteriorabili: 1 settimana Organi in movimento: 1 mese Pompa di backup: 3 giorni</p> <p>INDICI DI PRESTAZIONE:</p> <ol style="list-style-type: none"> tempi di manutenzione previsti/reali n.ro interventi a riparazione n.ro interventi correttivi <p>Metodo: valutazione sintetica dell'adeguatezza del programma di gestione dell'invecchiamento delle attrezzature negli stabilimenti Seveso indice I</p> | <p>Redazione del piano di manutenzione (*)</p> <p>Analisi degli indici di prestazione nella riunione del riesame</p> <p>Stima dell'invecchiamento del sistema e margini di miglioramento I stimato > I reale</p> |
| 5. Cambio d'uso | <ul style="list-style-type: none"> Dismissione Spostamento di impianto/nuove condizioni di utilizzo Fuori uso/rifiuto | | |

Tabella 5. Scheda vita lavorativa della pompa centrifuga.

Anche per questa attrezzatura, si propone un possibile elenco di attività che potrebbero costituire il PMC ritenuto efficace dal gestore per poter monitorare gli aspetti di invecchiamento della pompa che versa in condizioni di degrado. In sintesi, tali attività, laddove mancassero riferimenti di legge, potrebbero essere implementate sulla base di norme tecniche o sulla propria esperienza operativa e sono indicate nella Tabella 6:

| Attrezzatura critica | Criticità | Modalità di danno | Tipo di controllo | Periodicità | Estensione | Riferimenti | Note |
|----------------------|--------------------------|------------------------|--|-------------------------|------------|---|-----------------------------------|
| Pompa centrifuga | Sversamento dalle tenute | Corrosione erosione | Ispezione visiva Perdite Cavitazione Vibrazioni | Giornaliera | n.a. | Norma di settore Buone prassi Procedura interna Manuale d'uso e manutenzione | Check list |
| | | | Controllo: -livello visivo olio lubrificante - contaminazione fluido -serraggio supporti -allineamento | Settimanale | n.a. | | Check list |
| | | | Controllo strumenti Parametri caratteristici (Q, H) | Continuo/ DCS | n.a. | | Check list Manuale d'uso |
| | | | Controllo spessori | Triennale | 100% | | Rapporto di prova standard UNI EN |
| | | | Ispezione visiva linee di aspirazione e mandata | Giornaliera | n.a. | | Check list |
| | | | Controllo integrità - corpo pompa - voluta - linea d'assi | Annuale | n.a. | | Check list Manuale d'Uso |
| | | | Vibrazioni | Continuo/ datalogger | | | Manuale d'Uso |
| | | | Temperatura cuscinetti | Continuo/ datalogger | | | Manuale d'Uso |

Tabella 6. PMC - caso pompa centrifuga

5. Conclusioni ed approfondimenti futuri

Nel presente lavoro è stato presentato un format per la predisposizione del piano di monitoraggio e controllo del rischio invecchiamento negli stabilimenti soggetti al d.lgs. 105/2015. Il documento rappresenta un primo approccio a tale studio e sarà sottoposto ad ulteriori sviluppi e miglioramenti sulla base di una sperimentazione mirata e condivisa nell'ambito del gruppo di lavoro specifico costituito in seno al Coordinamento ex art. 11 del d.lgs. 105/2015. Oltre a poter rispondere alle richieste della normativa in ambito SGS per il controllo del pericolo di incidente rilevante relativamente alla gestione dei rischi legati all'invecchiamento ed alla redazione del relativo piano, i risultati potranno essere meglio approfonditi anche in relazione ad aspetti connessi all'affidabilità delle attrezzature e si prestano a studi più specifici come, ad esempio, utilizzo dei materiali. Nel primo caso, infatti, si prende atto che la logica di intervento di solito applicata prevede un approccio RCM (Reliability Centered Maintenance) per cui viene identificato, in via preliminare, il tasso di guasto atteso per il sistema critico e le possibili cause di danno. In genere si fa riferimento a banche dati consolidate nelle quali, sulla base delle ore di lavoro del sistema tecnico e secondo gli standard e la policy aziendali, il verificarsi dell'evento iniziatore può ritenersi accettabile. Se, invece, si optasse per svolgere tali attività sulla base dello stato reale dell'attrezzatura si adotterebbe una strategia proattiva che consentirebbe di individuare tempi e modi per migliorare l'efficacia dell'intervento. Le risultanze del piano possono essere analizzate in base agli indici di prestazione di progetto per la verifica dell'efficacia dell'analisi preliminare. Per quanto riguarda i materiali, un aspetto interessante è rappresentato dall'utilizzo di quelli compositi sempre più utilizzati per le loro proprietà fisico-meccaniche. Le peculiari e specifiche applicazioni industriali dei componenti in materiale composito non possono precludere la conoscenza della risposta alle sollecitazioni meccaniche, dei CnD applicabili, nonché degli elementi di riparabilità di tali materiali innovativi non convenzionali. Il monitoraggio e il controllo dei rischi legati all'invecchiamento delle attrezzature in materiale composito rappresenta un campo non del tutto condiviso e acquisito nell'industria di processo soggetta alle disposizioni della Direttiva Seveso III rispetto al quale potrebbe essere interessante intervenire con studi mirati.

Ringraziamenti

La tematica è argomento di approfondimenti in ambito del Gruppo di Lavoro "Invecchiamento attrezzature impianti" istituito presso il Coordinamento per l'uniforme applicazione sul territorio nazionale ai sensi dell'articolo 11 del D.lgs. 105/15. Si ringraziano per il contributo fornito i rappresentanti nel GdL di Assogasliquidi, Eni, Exxonmobil, Federchimica e Unione Energia per la Mobilità.

Bibliografia

[1] D.lgs. 26 giugno 2015, n. 105, Attuazione della direttiva 2012/18/UE relativa al controllo del pericolo di incidenti rilevanti connessi con sostanze pericolose.

[2] Directive 2012/18/EU of the European Parliament and of the Council of 4 July 2012 on the control of major-accident hazards involving dangerous substances amending and subsequently repealing Council Directive 96/82/EC (<https://eur-lex.europa.eu/legal->

[3] www.mase.gov.it/sites/default/files/archivio/allegati/rischio_industriale/lineaguidainvecchiamento2021.pdf

Security di una infrastruttura gas

R. Setola¹, A. Chittaro², A. Cestari²

¹ Università Campus Bio-Medico di Roma

² SNAM

Abstract

Come evidenziato anche dalla Seveso III e reso eclatante da quanto occorso al gasdotto Nord Stream 2, per gli impianti a pressione è fondamentale considerare in aggiunta a quelle che sono le problematiche proprie dell'impianto, anche gli aspetti connessi con eventuali azioni dolose. Tali azioni possono essere condotte da soggetti animati da diverse motivazioni che spaziano da rivendicazioni ambientaliste ad atti estorsivi fino ad azioni riconducibili ad attività geopolitiche. Tali azioni possono essere attuate sia mediante l'utilizzo di vettori fisici che attraverso azioni cyber ma anche con approcci più complessi che prevedono l'impiego di strategie ibride. Per contrastare questa tipologia di minaccia è fondamentale complementare la cultura della safety di processo con le competenze proprie della security aziendale in una visione olistica della sicurezza. Attività che impone agli operatori di svolgere specifiche analisi del rischio al fine di cogliere i potenziali pericoli derivanti da azioni dolose anche in collaborazione con il Ministero dell'Interno, la Presidenza del Consiglio dei Ministri e gli altri organi competenti. Analisi del rischio che deve tener conto in modo esplicito che a differenza di quelli che sono i pericoli di natura accidentale o naturale, le azioni dolose si caratterizzano per la presenza di antagonisti senzienti e ciò impone un orientamento diverso alla valutazione delle probabilità di accadimento (solo in parte riconducibili a serie storiche) ponendo di converso maggiore enfasi sugli aspetti di impatto potenziale e di resilienza. Da questa attività discende la necessità di predisporre un adeguato modello organizzativo che consenta di valutare in modo complessivo le problematiche di "security", che sia in grado di mettere in atto le adeguate contromisure anche sfruttando le moderne tecnologie ma soprattutto in grado di operare nell'ambito di una "security" partecipata che vede una sinergica collaborazione, nel pieno rispetto dei propri ruoli, fra la struttura di security aziendale e le diverse autorità pubbliche.

Questo lavoro illustra questa modalità di approccio prendendo in considerazione due dei progetti di maggiore rilevanza sviluppati negli ultimi anni in Italia ovvero il collegamento Trans Adriatic Pipeline (TAP) che porta in Italia il gas dall'Azerbaijan e il rigassificatore installato provvisoriamente nel porto di Piombino per sopperire alla crisi energetica innescata dall'invasione Russa dell'Ucraina.

Keywords: sicurezza partecipata, approccio olistico, cyber-physical system, sistemi di sicurezza, LNG.

1. Introduzione

Come evidenziato anche dalla Seveso III [1] e reso eclatante da quanto occorso al gasdotto Nord Stream 2 [2], per gli impianti a pressione è fondamentale considerare in aggiunta a quelle che sono le problematiche proprie dell'impianto, anche gli aspetti connessi con eventuali azioni dolose [3]. Tali azioni possono essere condotte da soggetti animati da diverse motivazioni che spaziano da rivendicazioni ambientaliste a atti estorsivi fino ad azioni riconducibili ad attività geopolitiche [4]. Esse possono essere attuate sia mediante l'utilizzo di vettori fisici che attraverso azioni cyber ma anche con approcci più complessi che prevedono l'impiego di strategie ibride. Per contrastare questa tipologia di minaccia è fondamentale complementare la cultura della safety di processo con le competenze proprie della security industriale in una visione olistica della sicurezza [5].

Per illustrare come tale integrazione sia possibile, oltre che auspicabile, in questo lavoro verrà presentato quanto fatto in ambito di "security" per la realizzazione del cantiere del TAP e per il rigassificatore di Piombino. Nello specifico il primo ha visto la necessità di realizzare un sistema di security partecipata in grado di contrastare frange anche violente di opposizione cresciute sulla scorta di una visione distorta dei rischi legati all'impianto alimentata da una narrazione basata, essenzialmente, su fake news. Il secondo è stato un unicum a livello nazionale sia per quel che riguarda le tempistiche di realizzazione che per la sua collocazione all'interno di un porto operativo. Questi aspetti, unitamente alle diverse classi di minacce alle quali questi impianti sono potenzialmente esposti, hanno condotto alla definizione di un sistema di security incentrato su competenze professionali, compliance normativa, procedure e tecnologie che prendendo le mosse da una attenta analisi dei rischi, hanno consentito di definire una soluzione sistemica in grado di garantire elevati standard di security pur nel complesso quadro d'insieme.

2. La security nel cantiere del TAP

La realizzazione del Trans-Adriatic Pipeline (TAP) completato nell'ottobre del 2020 ha incontrato una forte opposizione per quel che riguarda l'approdo del gasdotto a Melendugno¹. Tale opposizione si è caratterizzata anche per episodi di violenza contro le installazioni della TAP e dei lavoratori² imponendo l'adozione di un opportuno modello di security al fine di garantire, in sicurezza, l'esecuzione delle diverse lavorazioni nei tempi previsti. Tale approccio si basa sulla attenta valutazione ed analisi dei fenomeni eversivi da contrastare da cui è scaturita una strategia basata su un modello di cooperazione pubblico privato e sulla installazione di specifiche strutture di sicurezza attive e passive. A tale attività si è

¹https://bari.repubblica.it/cronaca/2018/11/12/news/tap_manifestazione_all_alba_a_melendugno_per_dire_no_al_cantiere-211439342/

² <https://www.ilfoglio.it/cronache/2018/01/26/news/cantiere-tap-feriti-tre-poliziotti-175431/>

affiancata un'azione di contrasto alle fake-news. Il tutto in una cornice di sinergica cooperazione pubblico-privato con le autorità preposte, a partire dalla collaborazione con la Questura di Lecce.

2.1 Il cantiere di Melendugno

Il cantiere di Melendugno aveva lo scopo di realizzare il micro-tunnel necessario per la creazione della condotta sottomarina che si innestava nella pipeline sottomarina a circa 600 metri dalla costa di San Foca. Il cantiere ha una forma irregolare illustrata nella Fig. 1.

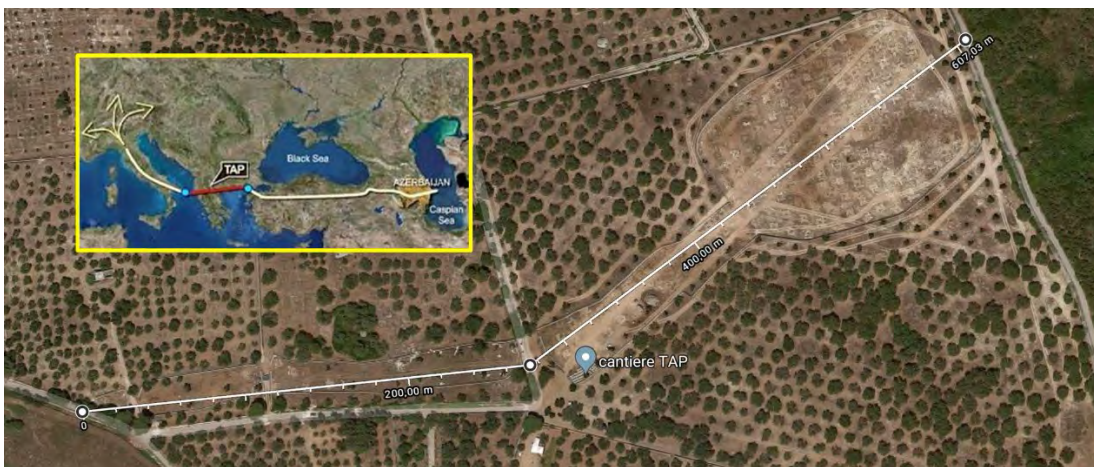


Figura 1. Cantiere TAP di Melendugno

In fase di progettazione, al fine di limitare al minimo i disagi per la popolazione, i progettisti avevano ottimizzato al massimo l'utilizzo dei terreni cercando di limitare al minimo l'espropriazione temporanea delle aree. Ciò ha implicato che su tutte le aree oggetto di espropriazione erano previsti specifici utilizzi funzionali alla realizzazione delle opere senza, però, tener conto delle problematiche di security e quindi non prevedendo né aree di stand-off perimetrali né gli spazi per la installazione delle misure di security. Tale scelta derivava da una visione "semplicistica" del problema della security che si limitava a prevedere un dispositivo basato su una recinzione perimetrale in reticolato utile per evitare l'accesso abusivo al cantiere e prevenire furti di materiale, ma non per contrastare una opposizione violenta ed organizzata [6].

Nel seguito verranno illustrati i principali elementi che hanno costituito il sistema di sicurezza messo in atto.

2.2 Metodologia adottata

La società TAP nel rendersi conto alla luce dell'occupazione del primo cantiere a Melendugno occorso nell'aprile del 2017 con distruzione sia della recinzione che di quanto in esso presente decise di affidare a Snam la gestione della security del cantiere. Snam è stata pertanto chiamata a mettere in campo le proprie

competenze in tema di security per garantire quanto necessario per la realizzazione dell'opera. Per tale attività Snam poteva contare sulle proprie esperienze, procedure e competenze che si sostanziano in un modello organizzativo in grado di approcciare il problema della security di un sito strategico in modo integrato.

Il punto di partenza di questa attività è stata l'analisi dei rischi andando comprendere i *modus operandi* degli oppositori all'opera. Questi erano composti, oltre a strati della popolazione atterriti da una narrazione fake sugli effettivi rischi dell'impianto, da frange violente riconducibili a ideologia ambientalista/antagonista simili ai movimenti no-Tav oppure no-Mose che hanno agito nel Nord d'Italia. Tali gruppi si caratterizzano per supportare la loro ideologia con azioni violente contro beni e materiali riconducibili, nel caso in specie, alla società TAP. All'interno di queste frange c'era, inoltre, l'ulteriore rischio che trovassero spazio anche elementi dell'estremismo anarchico il cui *modus operandi* è più pericoloso agendo questi ultimi anche mediante l'impiego di ordigni incendiari o esplosivi. Infine, si doveva tener conto della possibilità che la criminalità, sia locale che organizzata, potesse sfruttare lo scenario per perseguire propri fine.

Partendo da tali premesse si è andato a definire, unitamente al Ministero degli Interni e alla Questura di Lecce, quelli che dovevano essere i requisiti per il sistema di security del cantiere. Sistema che prevedeva la concorrente presenza delle attività delle forze dell'ordine, per quel che riguarda tutti gli aspetti di ordine pubblico, e dell'organizzazione di Snam per gli aspetti più prettamente di security del cantiere.

Questa attività ha trovato la sua sintesi in una stretta sinergia che ha portato ad una co-definizione dei requisiti anche tecnici del sistema di security. Nello specifico ci si è resi conto della necessità di dover avere da un lato una perimetrazione fisica atta a sopportare la pressione dei manifestanti ed a prevenire che il lancio di oggetti potesse incidere sulla salute di chi operava all'interno del cantiere e dall'altro di avere a disposizione un sistema di monitoraggio fisico e cyber in grado di aiutare le forze dell'ordine nell'individuare e riconoscere iniziative che prevaricavano la legittima protesta caratterizzandosi nella sostanza quali attività estremiste e violente. Lo scopo primario del sistema era quello di salvaguardare dell'incolumità delle maestranze, dei cittadini e delle forze dell'ordine (oltre che la tutela dei beni di TAP). Inoltre, il sistema doveva consentire l'attuazione di una strategia di difesa dinamica e adattativa dei presidi delle forze dell'ordine sul territorio che consentisse una corretta gestione dei momenti di "tensione" oltre che supportare le forze dell'ordine nell'individuare le singole responsabilità degli specifici atti violenti per poterli perseguire secondo quanto previsto dalla normativa vigente.

Si è arrivati ad un modello all'interno del quale l'autorità pubblica attua le sue proprie attività di monitoraggio del territorio sfruttando anche soluzioni tecnologiche innovative messe a punto da Snam.

2.1 La sicurezza perimetrale passiva

Il cantiere ha un perimetro di circa 1,5 km estremamente irregolare anche a causa dell'olografia dei luoghi e della presenza di alcuni vincoli imposti e per la tutela di specifiche essenze arboree. Inoltre, per esigenze di ordine pubblico, è stata fatta la richiesta di definire una soluzione che fosse rapidamente installabile e, all'occorrenza, riposizionabile in modo da avere una perimetrazione in grado di essere dinamicamente modificata. Le disposizioni urbanistiche vietavano, per altro, la realizzazione di qualunque tipo di fondazione o di ancoraggio della recinzione al terreno.

La soluzione adottata è stata quella di realizzare una recinzione basata su new jersey sormontati da una maglia elettrosaldata e da un concertina sfruttando elementi modulari illustrati nella Figura 2a

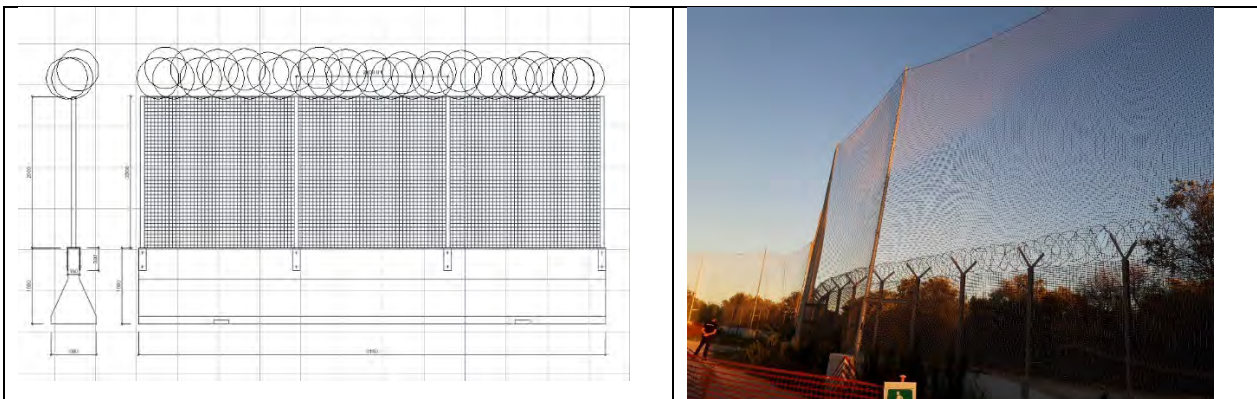


Figura 2. Recinzione di cantiere

Specifici accorgimenti sono stati introdotti per garantire continuità della struttura e l'impossibilità dello smontaggio dall'esterno.

In questo modo si è realizzata una barriera che, anche alla luce della presenza di forze dell'ordine all'interno del cantiere, era in grado di evitare lo scavalco da parte dei manifestanti. Inoltre, la struttura presenta sufficiente inerzia da non poter essere abbattuta o divelta oltre che una tempistica di installazione e riconfigurazione estremamente contenuta.

Per una maggiore tutela dei lavoratori che operavano all'interno del cantiere si è installata, inoltre, una seconda recinzione con una altezza di 9 metri il cui scopo era quello di evitare che eventuali oggetti lanciati dai manifestanti potessero colpire le maestranze.

2.1 La sicurezza perimetrale attiva

La irregolarità del perimetro e la necessità di un sistema velocemente deployabile e riconfigurabile e l'impossibilità di poter realizzare un anello di alimentazione lungo il perimetro ha suggerito di adottare un sistema di video sorveglianza basato su tecnologia multi-spettrale ed una approccio a controllo trasversale.

La soluzione delineata si basa su quattro moduli (torrette) autoportanti con autonomo basamento. Ciascuna torretta prevede la presenza di un palo alto 12 m sulla cui sommità è installata una telecamera termica rotativa ad alta velocità affiancata da due telecamere ottiche brandeggianti 4k dotate di sistema di visione notturna oltre agli apparati di comunicazione radio. Nel basamento trovano alloggio i sistemi di controllo, i pannelli solari per l'alimentazione, un gruppo elettrogeno, un sistema di storage locale.

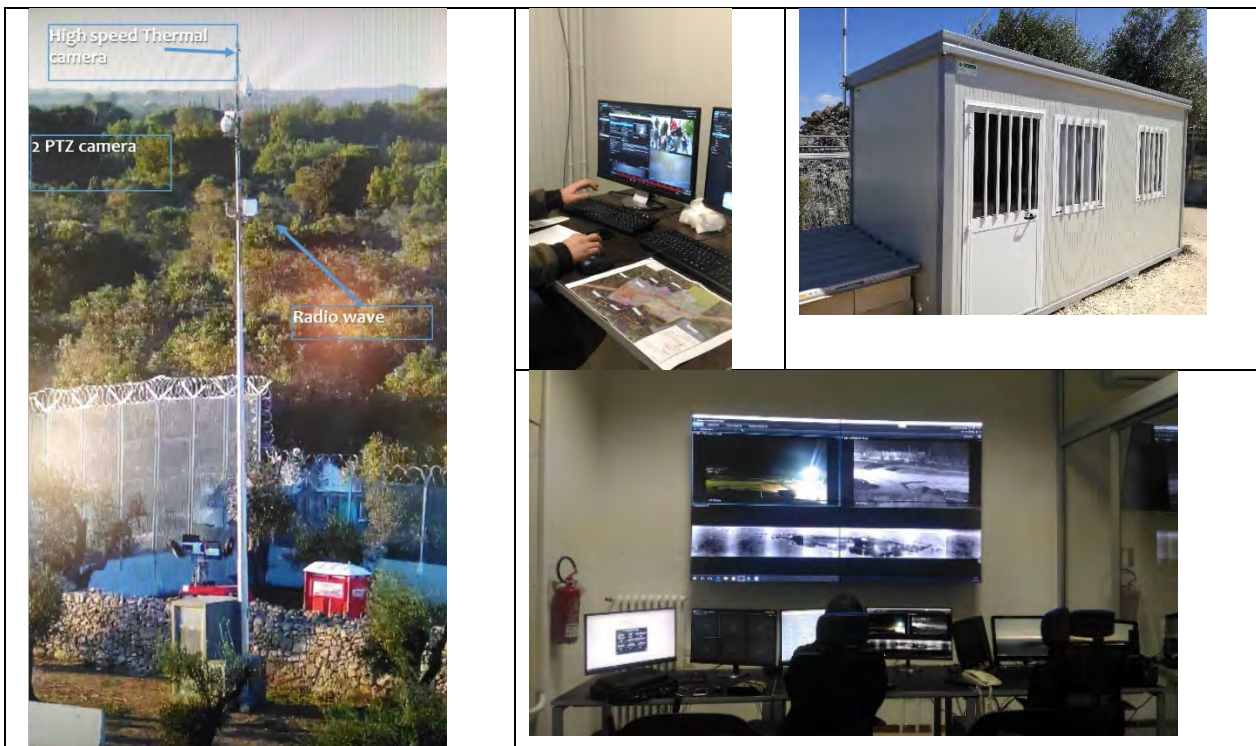


Figura 3. Recinzione di cantiere.

L'elemento maggiormente innovativo è stato l'utilizzo di una telecamera termica rotante in grado effettuare una scansione di 360° ogni 2 secondi. Il sistema è in grado di individuare e classificare, animali, persone e veicoli fino ad una distanza di quasi 200 m fornendone le coordinate geografiche. Queste ultime sono utilizzate per il puntamento automatico delle due telecamere ottiche.

Grazie alla possibilità di inserire delle maschere a livello software è stata possibile creare delle zone di attenzione, a vario livello di criticità (ovvero delle virtual fence) che se oltrepassate fanno scattare specifici allarmi. L'utilizzo di maschere ha inoltre consentito di evitare qualunque violazione dello statuto dei lavoratori in quanto le attività svolte all'interno dell'area del cantiere non attivavano alcun allarme.

Per prevenirne il danneggiamento tutte le telecamere avevano un livello di protezione IP66 e IK10. La posizione delle torrette (sia nella configurazione iniziale che in tutte i successivi riposizionamenti) è stata studiata per ottimizzare la copertura con il vincolo di risultare in copertura ottica reciproca.

Per quel che riguarda la condivisione delle immagini si è preferito (stante l'impossibilità di realizzare connessioni in fibra) l'utilizzo di ponti radio punto-punto fra le quattro torrette operati in banda 5 GHz. Tale soluzione, sebbene maggiormente costosa e più complessa da installare, è stata preferita alla realizzazione di un LAN wi-fi per evitare rischi di cyber security.

Tutte le immagini arrivavano in tempo reale sulla torretta #1 che le rendeva disponibili al centro di controllo locale all'interno del cantiere e tramite un ponte radio in banda 17 GHz alla sala di operativa della Questura di Lecce.

Sia presso il centro di controllo nel cantiere che presso la Questura di Lecce specifici sistemi provvedevano alla conservazione delle immagini.

Per ridondanza ogni torretta è dotata di un suo sistema di storage in grado di immagazzinare le immagini provenienti dalle proprie telecamere fino a 7 giorni e di una SIM dati per la trasmissione delle immagini alla Questura di Lecce anche in assenza del ponte radio.



Figura 4. Recinzione di cantiere

Per consentire un flusso costante di immagini in formato full hd 4k si è optato per un protocollo di compressione H265.

Tutte le immagini, sia quelle ottiche che quelle termiche, confluivano all'interno dell'ambiente di video analisi milestone che ne garantiva oltre che la fruizione distribuita anche le funzioni di motorizzazione e sincronizzazione temporale tramite un'interfacce di semplice utilizzo da parte delle forze dell'ordine.

Per consentire un miglior impiego del sistema, le immagini era condivisibili anche su dispositivi mobili.

Si precisa che le immagini era accessibili esclusivamente agli operatori delle forze dell'ordine.

2.4 Le fake news e il monitoraggio cyber

Oltre al monitoraggio del sito fisico, SNAM ha messo in campo una strategia di monitoraggio del web per individuare e contrastare le notizie false che circolavano in rete circa la pericolosità dell'impianto e le potenziali conseguenze negative per l'ambiente e le persone. Tale attività condotta esclusivamente su fonti aperte mediante tecniche OSINT ha consentito di effettuare una corretta narrazione che ha contribuito a ridurre il sentimento negativo nella popolazione.

3. La security nel rigassificatore a Piombino

Per limitare la dipendenza nazionale dalle importazioni di gas dalla Russia, il governo in concomitanza con l'invasione dell'Ucraina ebbe a chiedere a SNAM di attivarsi per incrementare rapidamente la capacità di rigassificazione nazionale, attraverso la l'installazione di Floating Storage e Regasification Unit (FSRU). In particolare, la richiesta del governa era di avere operativa entro la primavera del 2023 almeno una FSRU. Sfida complessa alla luce del poco tempo a disposizione (meno di un anno). Dopo un rapido e accurato studio si è individuato nel porto di Piombino la sede più idonea sulla scorta della vicinanza ad un punto di innesto con la rete nazionale di trasporto del gas, la disponibilità di capacità residua nella condotta (aspetto questo che ha di fatto escluso tutti gli approdi nel sud Italia), la disponibilità di una banchina con adeguato pescaggio e lunghezza. Tutte caratteristiche possedute dal porto di Piombino che aveva anche l'ulteriore aspetto positivo che la banchina da utilizzare si inserisce in un'area industriale dismessa e non urbanizzata.

L'impegno di SNAM e di tutti soggetti coinvolti ha consentito che Il 7 luglio 2023 la nave Golan Tundra ha potuto iniziare ad immettere gas nella condotta nazionale. La Golar Tundra è una nave FSRU lunga 292,5 metri, larga 43,4 metri e alta 55 metri, dotata di 4 serbatoi per lo stoccaggio di 170mila metri cubi di gas naturale liquefatto e una capacità di rigassificazione continua di 5 miliardi di metri cubi l'anno.

L'iniziativa ha trovato però oppostone nella popolazione locale allarmata dai potenziali pericoli legati al funzionamento dell'impianto. Pericoli legati sia alla peculiarità dell'impianto, ma anche a potenziali rischi di security anche alla luce del particolare scenario geopolitico.

L'esperienza maturata nella la gestione della security del TAP, fortemente incentrata su un modello di collaborazione pubblico-privato, ha consentito di mettere a punto in brevissimo tempo un analogo ed efficace sistema di security per l'impianto di rigassificazione di Piombino.

Infatti, per garantire la sicurezza della popolazione, oltre che dell'impianto, SNAM ha realizzato un security risk assessment condiviso anche con l'Autorità Portuale, la Capitaneria di Porto, la Prefettura di Livorno e le altre amministrazioni competenti, le quali hanno definito una specifica analisi dei rischi andando ad individuare le principali minacce. Sulla scorta di questa analisi si è provveduto a definire un Sistema Integrato di Sicurezza (SIS) in grado di ridurre ad un livello accettabile i diversi rischi (come schematicamente illustrato nella figura 5).

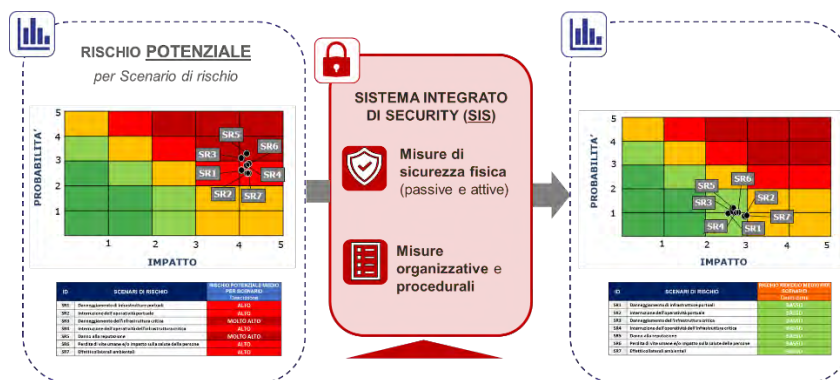


Figura 5. Processo di analisi e gestione dei rischi per la FSRU di Piombino

Tale SIS è stato poi incluso nel Port Facility Security Plan (PFSP) che rappresenta il documento principale sulla quale si basa la gestione dell'intera security, sia in condizioni di normale operatività che di eventuale emergenza.

In particolare, il SIS include tanto misure di sicurezza passive, che sistemi di sorveglianza attivi; oltre che gli aspetti organizzativi e procedurali.

Per ciò che riguarda la sicurezza fisica è stata realizzata sia una recinzione perimetrale alla banchina dove è ormeggiata la Golar Tundra che un'ulteriore recinzione a tutela degli accessi alla nave ed alle diverse facility presenti sulla banchina.

Sono stati poi installati un insieme di impianti fra i quali:

- Sistema antintrusione: previsto su recinzioni perimetrali, varchi, locali tecnici/aree sensibili ed integrato con la piattaforma di supervisione e gestione eventi di security (PSIM - Physical Security Information Management).
- Sistema di controllo accessi: per gestire e controllare puntualmente l'accreditamento e gli accessi in ingresso/uscita dai varchi pedonali e carrabili. Previsti in dotazione alla vigilanza strumenti portatili di controllo di persone e bagagli.

- Sistema di comunicazione safety & security: previste postazioni videocitofoniche di chiamata/risposta per gestire gli accessi carrabili e pedonali sia dal posto di guardia locale che dai SOC Snam; sistema di altoparlanti; sistema radio in uso al personale di vigilanza e di emergenza.
- Sistema di videosorveglianza: per monitoraggio accessi, aree di impianto, specchio di mare e locali tecnici/aree sensibili (previste telecamere ottiche HD, termiche, PTZ, radar termici 360°, dotati di algoritmi di analisi video avanzata; è inoltre previsto l'uso delle telecamere a bordo dell'FSRU, utilizzabili anche ai fini security per il monitoraggio delle aree esterne alla nave).
- Sistema di supervisione di security (PSIM): per la gestione integrata dei sistemi di sicurezza, presente localmente presso il posto di guardia ed in remoto negli attuali Security OperationsCenter (SOC) di Snam.
- Infrastruttura di alimentazione elettrica e dati: per consentire l'alimentazione e la connettività SIS degli apparati di Security verso gli apparati di centro ubicati presso la sala apparati SIS locale e gli attuali SOC di Snam; tale infrastruttura è fisicamente segregata rispetto a tutti gli altri impianti elettrici di sito.
- Sistema di illuminazione: a copertura di tutte le aree (banchina, FSRU e specchio di mare).

Per garantire la corretta gestione di tutti gli aspetti di security sono state elaborate specifiche procedure che definiscono le modalità di gestione dei singoli eventi sia in condizioni ordinarie che straordinarie incluso il piano di Business Continuity ed il piano di gestione delle emergenze (HSEQ). Questi documenti sono stati redatti con un approccio KISS (*keep it simple and short*) con l'obiettivo di avere delle procedure snelle, facilmente consultabili e seguibili dai vari operatori. Il tutto, ovviamente, affiancato da un percorso continuo di formazione e familiarizzazione per tutte le figure professionali che operano nel perimetro della security del FSRU.

4. Conclusioni

L'esperienza di quanto fatto per la security del TAP e del FSRU di Piombino hanno evidenziato l'importanza di diversi aspetti.

Il primo è sicuramente quello di dove perseguire un modello di sicurezza partecipato che, nel pieno rispetto dei singoli ruoli, vede una proficua collaborazione fra soggetti pubblici ed operatori privati su un piano di reciproca conoscenza, corretta cooperazione e scambio di informazioni bi-direzionale.

Il secondo, l'importanza di avere modelli di gestione della security che prendano le mosse da una attenta e costante analisi dei rischi faccia seguire l'adozione di specifiche e commisurate misure di sicurezza. Misure che debbono, a causa della variabilità della minaccia, essere dinamiche, riconfigurabili ed adattabili al mutare dello scenario.

Il terzo aspetto riguarda è l'importanza del fattore umano, nessuno dei progetti illustrati si sarebbe potuto realizzare senza la presenza di personale competente, motivato e adeguatamente supportato. Attività questa che passa per la valorizzazione delle competenze e dei meriti dei singoli, a cui si affianca un percorso di crescita e formazione tecnica e aziendale. Il che si traduce, semplificando, nel modo in cui è opportuno che vengano redatti documenti procedurali il cui scopo non è la mera necessità di essere compliant alle norme ma uno strumento agile che può utilizzato proficuamente da chi si trovi a dover operare in situazioni sia ordinarie che di emergenza.

5. Bibliografia

- [1] Ylönen, M., Tugnoli, A., Oliva, G., Heikkilä, J., Nissilä, M., Iaiani, M., ... & Del Prete, E. (2022). Integrated management of safety and security in Seveso sites- sociotechnical perspectives. *Safety science*, 151, 105741.
- [2] GÜLCAN, T. A., & ERGİNER, K. E. (2023). NATIONAL AND INTERNATIONAL MARITIME SITUATIONAL AWARENESS MODEL EXAMPLES AND THE EFFECTS OF NORTH STREAM PIPELINES SABOTAGE. *International Journal of Critical Infrastructure Protection*, 100624.
- [3] Setola, R., Faramondi, L., Salzano, E., & Cozzani, V. (2019). An overview of cyber-attack to industrial control system. *Chemical Engineering Transactions*, 77, 907-912
- [4] Oliva, G., Faramondi, L., Setola, R., Tesei, M., & Zio, E. (2021). A multi-criteria model for the security assessment of large-infrastructure construction sites. *International Journal of Critical Infrastructure Protection*, 35, 100460.
- [5] Tugnolia, A., Iaiania, M., Olivab, G., Salzanoa, E., Setolab, R., & Cozzania, V. (2019). Physical security barriers and protection distances for seveso sites. *Chem. Eng. Trans*, 77.
- [6] Arata, M. J. (2006). *Construction site security*. McGraw Hill Professional.

Attrezzature a pressione a servizio di un simulatore di ageing su collettori solari

M. Del Gaudio¹, C. Piccolo¹, A. De Cristofaro¹, A.M. Ammendola², F. Vitobello²

¹ Inail - Uot di Avellino

² Tresol s.r.l. - Gruppo TVP Solar

Abstract

La richiesta di fonti energetiche alternative ed il mercato in progressiva espansione non possono prescindere da un'evoluzione ed un miglioramento dei processi produttivi.

L'affidabilità dei prodotti e la durata nel tempo, oltre chiaramente ai costi di produzione e vendita, risultano elementi tali da determinare il successo del prodotto in un mercato competitivo. La durabilità nel tempo degli impianti, le particolari condizioni di esposizione alle intemperie, sicuramente al sole ed al freddo, con sbalzi termici a volta anche estremi, rappresentano "la normalità" per la tipologia dell'attrezzatura stessa.

Occorre considerare inoltre un aspetto di preponderante importanza quale la sicurezza tanto degli addetti alla produzione ed installazione di suddette apparecchiature nonché quella degli utilizzatori, i quali potrebbero incorrere in rischi residui legati appunto alla "vita residua" degli impianti.

Nel presente studio verranno illustrate le metodologie, adottate presso lo stabilimento di produzione di una azienda localizzata nel comprensorio industriale di Pianodardine di Avellino, per testare la resistenza all'invecchiamento di collettori solari ad alto rendimento. In particolare, verranno illustrate le specificità di un impianto per effettuare test di ageing e sottoporre a stress controllato gli innovativi pannelli solari termici ad alte prestazioni ivi realizzati, al fine di valutarne la durabilità nel tempo e le condizioni di utilizzo.

Nel corso dello studio, si presenteranno alcuni esempi di soluzioni di miglioramento dei componenti del pannello ottenuti grazie all'utilizzo dell'impianto di test.

Keywords: collettori solari, ageing, generatori di vapore.



Figura 1. Stabilimento di produzione dei pannelli solari termici

1. Mercato in crescita per il solare termico

Il Programma di collaborazione per il riscaldamento e il raffreddamento solari dell'Agencia Internazionale dell'Energia ha pubblicato il rapporto **Solar Heat Worldwide 2022**, dal quale, tra gli altri dati emerge che dopo anni di calo, si registra finalmente una crescita nel mercato del solare termico.

Alla fine del 2021, si legge nel rapporto, la capacità solare termica in esercizio era di 533 GWh per una superficie di 746 milioni di m² di collettori, mentre il rendimento annuo registrato è stato pari a 425 TWh.

Tali dati si traducono in un risparmio di impatto ambientale corrispondente al **risparmio di 45,7 milioni di tonnellate di petrolio e 147,5 milioni di tonnellate di CO₂**.

Nel 2021 infatti sono stati realizzati 44 nuovi impianti solari termici di grandi dimensioni con una capacità di 142 MWh per il teleriscaldamento di edifici residenziali, commerciali e pubblici; alla fine dell'anno erano in funzione 530 impianti, per una capacità totale installata pari a 1.970 MWh, corrispondenti a 2,8 milioni di m² di superficie dei collettori.

Il succitato rapporto evidenzia anche come il mercato dei sistemi che combinano fotovoltaico e solare termico (collettori PVT) abbia registrato una **crescita significativa del 13%** tanto che nel 2021 sono stati messi in servizio circa 6mila nuovi sistemi PVT, per un numero totale a fine anno di 34mila impianti.

I primi 3 Paesi per capacità totale installata a fine 2020 sono stati **Cina, Turchia e Stati Uniti**; tuttavia, il quadro è decisamente diverso quando si confrontano i dati su base pro capite, mentre sul podio in termini di capacità installata per mille abitanti erano Barbados, Cipro e Israele.

Nel 2020, specifica il rapporto, i collettori a tubi sottovuoto hanno rappresentato il 60% della nuova potenza installata, seguiti dai collettori piani con il 34%.

In un contesto globale, questa ripartizione è guidata principalmente dal **predominio del mercato cinese**, dove circa il 72% di tutti i collettori di nuova installazione nel 2020 sono stati a tubi sottovuoto.

Da tale report si evince anche che la quota del mercato indiano, relativa ai collettori di nuova installazione di tale tipologia è del 18%

Se l'attenzione viene poi rivolta a quanto accade a livello mondiale i dati emergenti testimoniano che la quota di collettori a tubi sottovuoto in tutto il mondo è diminuita da circa l'82% nel 2011 al 60% nel 2020, e, allo stesso tempo, i collettori piani hanno aumentato la loro quota **da circa il 15% al 34%**.

In Europa, la situazione è quasi l'opposto di quella cinese, con il 71% di tutti i collettori solari termici installati nel 2020 costituiti da collettori piani; in una prospettiva di medio termine, invece, la quota di collettori piani in Europa è diminuita dall'81% nel 2011 al 71% nel 2020. Complessivamente, la quota di collettori a tubi sottovuoto in Europa è aumentata tra il 2011 e il 2020 dal 16% al 28%, mentre si registra una crescita dell'interesse per sistemi solari termici applicati a **processi industriali**.

Almeno 74 sistemi di riscaldamento di processo sono stati realizzati nel 2020, con un numero di progetti oggi operativi pari a 891.

Nel grafico vediamo dunque come si è evoluta la capacità solare termica globale dei collettori vetrati e non: **dal 2000** è cresciuta da 62 GWth (89 milioni di mq) a 501 GWth (715 milioni di mq) **nel 2020**.

Conseguenza inevitabile di quanto appena detto è che la corrispondente **energia solare** annua è passata da 51 TWh nel 2000 a 407 TWh nel 2020; quindi in 20 anni la tecnologia è cresciuta di **8 volte**.



Figura 2. La capacità solare termica globale dei collettori 2000-2020

Nei collettori solari il fluido termovettore (tipicamente acqua) attraversa una serpentina in rame saldata ad un foglio di alluminio dotato di un coating selettivo. Il calore del sole riscalda il foglio di alluminio e viene trasportato via dal fluido che attraversa i tubi di rame. Il fluido caldo viene poi ceduto ad uno scambiatore per il successivo utilizzo in ambito civile e/o industriale.

In generale, il mercato del solare termico è stato limitato dall'incapacità tecnologica dei collettori tradizionali, sia *flat plate* sia *evacuated tube*, di raggiungere e lavorare a temperature operative più alte di 65°C.

Per colmare questo gap tecnologico sono nati nuovi collettori solari piani che sfruttano un innovativo isolamento all'alto-vuoto che limita le perdite termiche da convezione, permettendo di salire in temperatura al di sopra dei 65°C fino a raggiungere i 250°C, lavorando con alta efficienza nella conversione dell'energia solare in energia termica anche in territori a basso irraggiamento (tipo Europa continentale).

2. La piattaforma di ageing ad Avellino

2.1 I collettori solari

I collettori solari, oggetto del test prodotto dall'azienda sono speciali collettori piani ad ultra alto vuoto introdotti sul mercato negli ultimi anni.

All'interno dell'involucro del pannello, durante un processo produttivo proprietario, è creata una condizione di vuoto spinto (UHV) in grado di annullare gli scambi di calore per convezione, con conseguente aumento sia dell'efficienza, che delle prestazioni in generale (ad esempio delle potenziali temperature di esercizio).

L'elevato rendimento permette di raggiungere temperature del fluido termovettore superiori ai 180 °C, consentendo quindi l'adozione del prodotto in diversi ambiti, che vanno dalla produzione di acqua sanitaria fino alla produzione di vapore per usi industriali. L'involucro stesso (grazie anche al sigillo vetro-metallo proprietario) garantisce, inoltre, la conservazione nel tempo delle caratteristiche di efficienza, mentre i punti di contatto tra le serpentine del pannello e l'involucro costituiscono i potenziali punti di cedimento del prodotto. Pertanto, per poter valutare la durabilità nel tempo e garantirne una durata di 25 anni, si è reso necessario effettuare test idraulici significativi utilizzando un innovativo impianto di ageing.

MT-Power Specifications (v4 SK)



| Physical Characteristics | | |
|--|--|-------------------------|
| Dimensions | see diagram for details | |
| Unit Gross Area | 1.96 m ² | 21 sq. ft. |
| Aperture Area | 1.84 m ² | 20 sq. ft. |
| Weight | 53 kg | 117 lb |
| Fluid Volume | 1.4 L | 47 fl. oz. |
| Heat Absorber-Pipe | Al sheet + Cu pipe | |
| Absorber Coating | Alanod Mirotherm | |
| Back-plate | AISI 441 stainless steel | |
| Glass Coating | Single-sided anti-reflective (interior face) | |
| Connecting Ports | SMS PN16 | |
| Operating Conditions | | |
| Stagnation Temperature | 302 °C | 576 °F |
| Max. Operating Pressure | 16 bar | 232 psi |
| Pressure Drop H ₂ O @ 260 l/h ; 50°C | 1.4 kPa | 138 mm H ₂ O |

Figura 3. Caratteristiche del pannello

Il test è condotto non solo allo scopo di individuare la durabilità nel tempo, ma anche di monitorare eventuali criticità e, conseguentemente, migliorare sia le caratteristiche del prodotto che quelle della componentistica dell'impianto idraulico a pressione, di cui è composto il campo solare termico, quali: flessibili, valvole, flange, guarnizioni, connettori, etc.

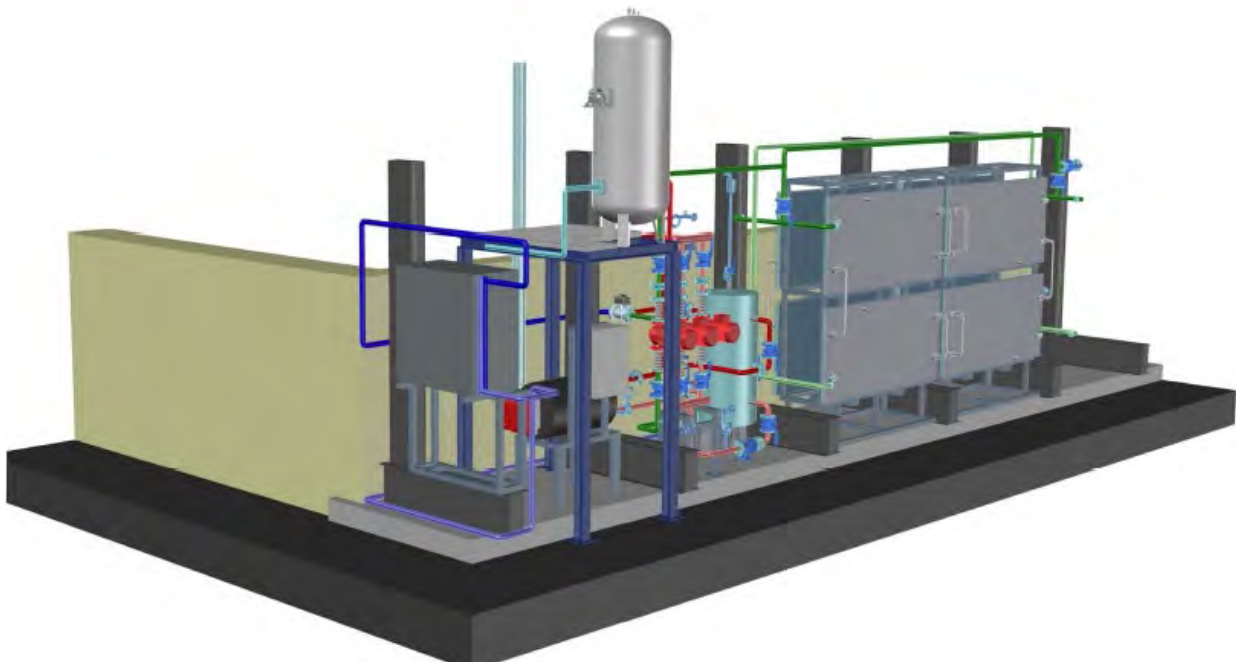


Figura 4. Impianto di ageing

2.2 Dati di progetto

I parametri caratteristici di funzionamento dell'impianto sono individuati sulla scorta delle condizioni di seguito specificate:

Condizioni di esercizio

- Temperatura massima di esercizio del generatore: 180 °C.
- Pressione massima di esercizio del generatore: 10 bar.

Specifiche di targa del generatore

- Temperatura massima di esercizio del generatore: 190 °C.
- Pressione massima di esercizio del generatore: 11,76 bar.
- Potenza termica del generatore: 30 kW.
- Pressione di taratura della valvola di sicurezza: 11,2 bar.

L'impianto di ageing (schema funzionale Fig.5) è sostanzialmente costituito da una sezione di generazione del fluido caldo (acqua surriscaldata) con accumulo inerziale, da un circuito di raffreddamento e dal circuito di prova, costituito complessivamente da n.8 collettori solari, suddivisi su n.2 stringhe indipendenti da 4 elementi ciascuna.

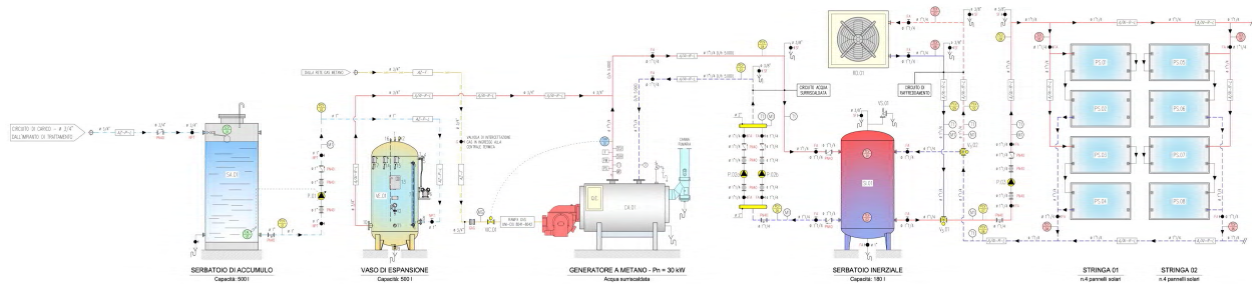


Figura 5. Schema funzionale impianto di ageing

In particolare, sono presenti:

- 1) **Un generatore di acqua surriscaldata** alimentato a metano con un volume di acqua di 12 litri con potenza termica nominale di 30 kW, una pressione max di esercizio di 11,76 bar ed una temperatura max di esercizio di 190 °C.
- 2) **Un serbatoio inerziale** in cui il fluido caldo viene immagazzinato mantenuto ad una temperatura di 175 °C. Il serbatoio ha una capacità di 180 litri, una pressione max di esercizio di 16 bar ed una temperatura max di esercizio di 180 °C.

Sulla tubazione di mandata della caldaia e sul serbatoio inerziale sono installate valvole di sicurezza con pressione di taratura: **11,2** bar.

Dal serbatoio inerziale, il fluido vettore viene inviato al circuito di prova, costituito da una sola stringa di n.4 pannelli solari.

Il pannello presenta le seguenti caratteristiche:

- Dimensioni (LxHxP): mm 2014x975x115.
- Superficie: mq 1,84.
- Peso: 53 kg.
- Capacità: 1,4 litri.
- Perdita di carico: 1,4 kPa.
- Pressione max di esercizio: 16 bar.
- Temperatura di stagnazione: 302 °C.
- Potenza di picco: ~1,1÷1,4 kW.

Il processo di prova si realizza mediante una serie di cicli di funzionamento che, ad intervalli prestabiliti, sottopongono i componenti a condizioni di esercizio alternativamente in regime di alta (175 °C) e bassa (ambiente+10 °C) temperatura. L'alternanza è gestita da una **coppia di valvole deviatrici a 3 vie**, motorizzate, che indirizzano la circolazione del fluido vettore sul circuito caldo (alimentato dalla caldaia), ovvero sul circuito di raffreddamento, costituito da un dissipatore aria-acqua, dotato di pacco di scambio a lamelle e ventilatore di diffusione aria.

Il radiatore presenta le seguenti caratteristiche:

Portata aria: 12.000 mc/h. Temperature IN/OUT: 180,0/146,9 °C.

3) Un vaso di espansione per acqua surriscaldata della capacità di 500 lt., pressione massima di esercizio 16 bar temperatura massima di esercizio 204 °C.

Il vaso è collegato ad un apposito sistema di reintegro da una rete esistente (acqua demineralizzata). Al vaso sono associate:

- Una valvola di sicurezza con taratura a 16 bar
- Una sonda di minimo livello

4) Un serbatoio di accumulo in acciaio inox a pressione atmosferica della capacità di 550 lit. (acqua fredda) che riceve acqua trattata in un impianto di addolcimento.

La circolazione del fluido vettore all'interno delle tubazioni è affidata a **n. 3 elettropompe centrifughe** monostadio a motore ventilato, del tipo in-line, per acqua surriscaldata (2 installate sul circuito primario caldo e l'altra sul secondario caldo/freddo), di idonee caratteristiche.

L'impianto è corredato dei necessari dispositivi di comando, regolazione e controllo ed è interfacciato con il sistema di supervisione per il monitoraggio e la registrazione dei dati rilevati dalle sonde di campo, durante tutto il ciclo di prova.

I collettori sono inoltre direttamente esposti alle intemperie che per le caratteristiche climatiche di Avellino prevedono temperature inferiori a 0 °C in inverno e superiori a 35 °C in estate, una umidità ed una piovosità normalmente elevata spesso con venti di forte entità.

Piattaforma di ageing

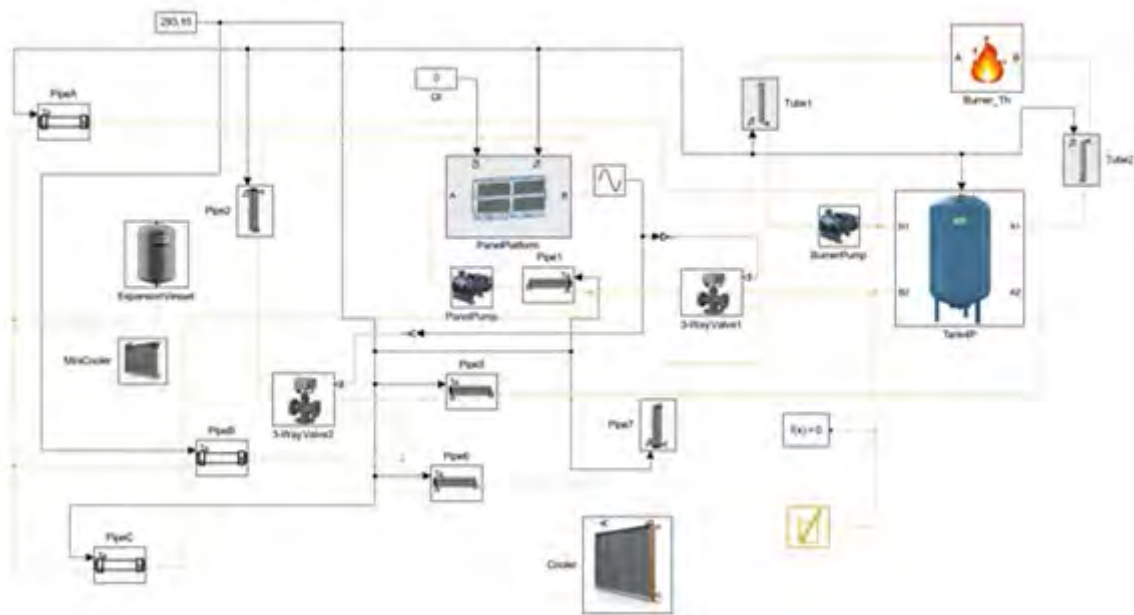


Figura 6. Piattaforma di ageing

Il sistema è concepito per simulare in maniera repentina un intero ciclo di vita del componente, sottoponendolo a sollecitazioni fisiche ripetute e variando la temperatura del fluido tra i valori minimo e massimo di set-point, con una frequenza stabilita.

Con 3 cicli/ora ed un'escursione termica variabile tra i valori di temperatura T_{min} ($t_{ambiente} + 10\text{ °C}$) e T_{max} (175 °C) nell'arco dell'intera giornata (24 ore), si ottengono complessivamente 72 cicli, pertanto, 5 giorni di processo equivalgono ad 1 anno di vita del prodotto (360 cicli).

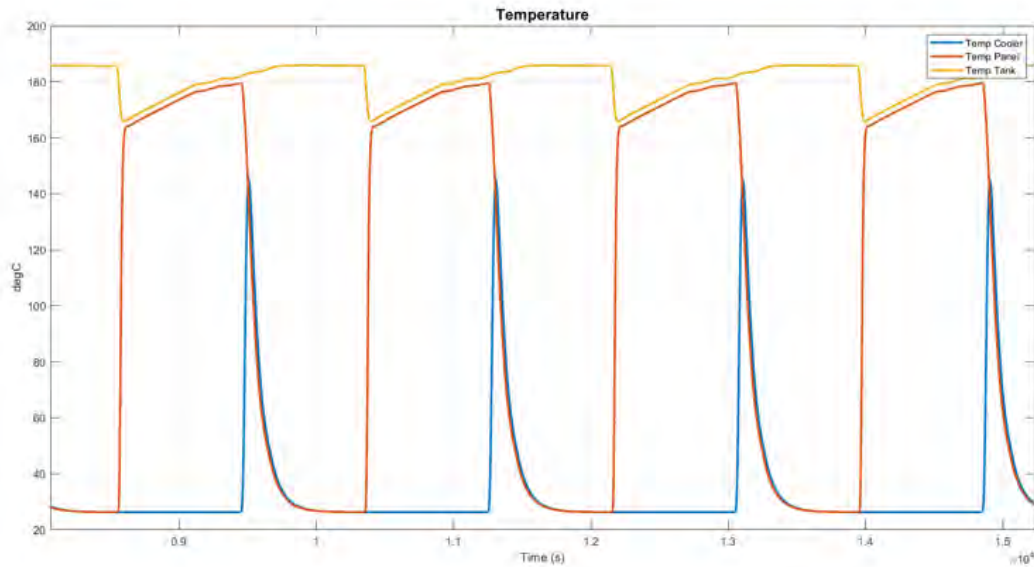


Figura 7. Cicli di prova

2.3 Vantaggi ottenuti dall'utilizzo dell'impianto di ageing

L'impianto di ageing, nonostante la sua recente entrata in servizio, ha consentito di risolvere, attraverso un'evoluzione dei componenti del pannello, alcune criticità emerse in campo.

L'utilizzo della piattaforma ha consentito di:

- **riprodurre il malfunzionamento riscontrato in campo dovuto alla comparsa di perdite su una percentuale di connettori dei pannelli già dal primo anno di esercizio.**
- **individuare le potenziali soluzioni,**
- **effettuare i test sulle soluzioni ipotizzate,**
- **validare la soluzione scelta,**

con conseguente miglioramento del prodotto.

A titolo di esempio si riportano i risultati del lavoro svolto:

- **SOLUZIONE 1:** sostituzione della guarnizione in FKM con guarnizione in grafite (Origraph).
- **SOLUZIONE 2:** adozione di un connettore a crimpare in sostituzione del precedente connettore a vite.

La SOLUZIONE 1 ha consentito di effettuare un retrofit di tutti gli impianti installati.

La SOLUZIONE 2: è stata utilizzata per tutti i nuovi campi

Un procedimento analogo è stato eseguito per la verifica della componentistica degli impianti solari.

2.4 La certificazione

L'impianto di ageing nel suo complesso non è soggetto ad attività certificative previste dal campo di applicazione del dm 329/2004 (*Regolamento recante norme per la messa in servizio ed utilizzazione delle attrezzature a pressione e degli insiemi di cui all' art. 19 del d.lgs. 93 del 25 febbraio 2000*) tenuto conto che non è oggetto di commercializzazione.

Contrariamente rientrano nel suddetto campo di applicazione alcuni componenti singoli in relazione ai valori di pressione e di volume.

In particolare, su richiesta dell'azienda, sono stati oggetto di verifica contestuale di messa in servizio ai sensi degli artt. 4 e 6 del dm 329/2004 da parte della competente UOT di Avellino il **serbatoio inerziale** per accumulo di fluido caldo (Pressione 16 bar Volume 180 lt) ed il **vaso di espansione** (Pressione 16 bar Volume 500 lt).

Le attività di verifica in relazione ai disposti normativi di cui al dm 329/2004 hanno interessato soltanto i componenti descritti nella piattaforma di ageing presente esclusivamente presso l'azienda produttrice dei pannelli ad Avellino.

Tuttavia, esigenze commerciali hanno richiesto all' azienda certificazioni da fornire nella fase di installazione presso clienti esterni per impianti di pannelli solari installati nella loro complessità.

Certificazioni che in alcuni casi riguardano i singoli componenti in relazione ai valori di pressione e di volume, come nel caso della piattaforma di ageing suddetta, ma in alcuni casi riguardano l'intero impianto in relazione ai valori complessivi dei volumi dei tubi presenti nei pannelli solari installati che, come visto, hanno un volume per singolo pannello di 1,4 lt con una pressione di 16 bar.

In relazione a quanto sopra risulta evidente che l'impianto dovrà essere certificato secondo quanto previsto dalla Direttiva PED 2014/68/UE e richiedere l'intervento di un Organismo Notificato secondo i moduli di valutazione che l'azienda riterrà opportuno adottare.

3. Conclusioni

Nella verifica delle attrezzature a pressione i tecnici Inail debbono analizzare impianti estremamente variabili per caratteristiche tecniche ma, soprattutto, utilizzati per scopi più disparati.

In molti casi il progettista dell'azienda adotta delle soluzioni originali in funzione dell'uso specifico ed è quindi necessaria una collaborazione con i tecnici Inail per verificare che le soluzioni adottate siano comunque conformi a quanto richiesto dalla normativa vigente.

In impianti come quello esaminato l'estrema variabilità delle prestazioni richieste sollecita, in modo significativo, i vari componenti e quindi ancor più importante verificare che siano presenti i più elevati requisiti di sicurezza.

Risulta importante, pertanto, il confronto tra tecnici INAIL, progettisti, costruttori e parte commerciale per garantire l'omogeneità della certificazione che sia conforme su tutto il territorio nazionale e consentire all' azienda di poter proporre il prodotto

nel pieno rispetto delle normative vigenti, garantendo sicurezza funzionalità e durata nel prodotto sempre nell'ottica della salvaguardia della salute e sicurezza dei lavoratori ed utilizzatori impegnati

4. Bibliografia

[1] Decreto Ministeriale n° 329 del 01/12/2004. Regolamento recante norme per la messa in servizio ed utilizzazione delle attrezzature a pressione e degli insiemi di cui all'articolo 19 del decreto legislativo 25 febbraio 2000, n. 93. emanato/a da: Ministro delle Attività Produttive Gazz. Uff. Suppl. Ordin. n° 22 del 28/01/2005.

[2] TVP Solar product Datasheet

[3] Solar Heat Worldwide 2022. International Energy Agency

Analisi congiunta dei settori “Seveso” e “Attrezzature a pressione”: esame e approfondimento statistico dei dati istituzionali

C. Simeoni¹, A. Nebbioso¹, A. Di Francesco², P. Iacono³

¹Inail – Dit

²Inail – DiMeLLa

³Inail - Segreteria tecnica del Presidente, Vicepresidente e CDA

Abstract

In riferimento alla ormai pluriennale attività circa l'analisi degli infortuni occorsi negli stabilimenti che utilizzano attrezzature a pressione e che ricadono nella legislazione “Seveso”, il lavoro fornisce l'aggiornamento delle informazioni per il periodo 2017-2020. Attraverso l'implementazione della metodologia atualizzata e utilizzata per la rappresentazione statistica degli stabilimenti rientranti nell'ambito di applicazione del D.lgs. 105/2015, vengono forniti i risultati dell'analisi condotta solo su quelli che rientrano contemporaneamente in entrambi i settori: “Seveso” e “Pressione”. In continuità con l'impostazione dei lavori presentati nel corso delle ultime edizioni del convegno, l'analisi sintetizza molti degli aspetti che rientrano nelle competenze dell'Inail, soprattutto in relazione alle denunce di infortunio, ponendo, ancora una volta, l'attenzione sul lavoratore e sulla sua sicurezza [1,2,3].

1. Introduzione

La direttiva "Seveso" (Direttiva 2012/18/UE del Parlamento europeo e del Consiglio, del 4 luglio 2012, sul controllo del pericolo di incidenti rilevanti connessi con sostanze pericolose, recante modifica e successiva abrogazione della Direttiva 96/82/CE del Consiglio (anche nota come Direttiva Seveso III), è correlata al controllo di incidenti gravi che coinvolgono sostanze chimiche pericolose per gli esseri umani e l'ambiente. Le aziende sono soggette alla direttiva Seveso in base alla quantità di sostanze pericolose detenute, definite secondo il Regolamento UE n. 1272/2008 ed elencate nell'allegato 1 della Direttiva.

La legislazione vanta oltre quattro decenni di applicazione che hanno portato alla consolidazione di linee guida dettagliate, nonché di misure di prevenzione e protezione che devono essere attuate dagli Stati membri dell'UE. Queste misure si traducono in obblighi tecnici e amministrativi sia per gli operatori degli impianti che per le Autorità Competenti e gli Organismi Tecnici.

Uno degli aspetti rilevanti è che l'attuazione di un sistema di gestione per il controllo del pericolo di incidenti gravi, obbligatorio per tutti i tipi di impianti del settore, rafforza la consapevolezza necessaria per la gestione dei rischi presenti nella propria

realtà produttiva. Di pari passo con questo aspetto, il sistema di controllo svolto dalle autorità competenti e dagli organismi tecnici è ora meglio strutturato e articolato rispetto al passato.

Molti studi nel campo della direttiva Seveso sottolineano queste considerazioni e danno principalmente evidenza agli aspetti di natura puramente ambientale. Invece, le analisi legate alla salute e alla sicurezza dei lavoratori, in termini di incidenti occorsi, tradizionalmente non vengono affrontate [4].

Il lavoro utilizza un approccio che riguarda la salute e la sicurezza dei lavoratori in termini di eventi di infortuni occorsi nelle strutture soggette alla normativa Seveso.

In particolare, l'articolo intende rispondere alle seguenti domande:

- quale è il numero di infortuni verificatesi;
- quali sono le loro principali caratteristiche.

Materiali e metodi

Seguendo la classificazione italiana delle attività produttive (ATECO)[5], è molto difficile ricostruire un "settore Seveso". Le sostanze pericolose indicate nella Direttiva Seveso sono presenti in molti processi industriali e, di conseguenza, molti settori della classificazione ATECO potenzialmente rientrano in essa.

Inoltre, la legislazione Seveso si applica agli impianti intesi come unità ben identificate da limiti fisici, mentre i codici ATECO si riferiscono alle aziende, che sono realtà organizzative non necessariamente legate a una singola struttura fisica. In sintesi, dal momento che i dati disponibili si basano sulla classificazione ATECO, non è immediato estrarre dati specifici per il "settore Seveso".

Partendo dalla metodologia consolidata con i lavori precedenti, per il recupero delle informazioni, nel presente lavoro sono state migliorate le tecniche per la selezione degli infortuni accaduti negli stabilimenti SEVESO. L'identificazione degli stabilimenti è stata il punto di partenza per la delimitazione del settore Seveso. L'unico riferimento per conoscere i dati aggiornati riguardanti il numero e altre informazioni sugli stabilimenti, ai sensi del Decreto Legislativo n. 105/2015, è l'"Inventario Seveso" del Ministero dell'Ambiente e della sicurezza energetica (MASE) [6,7].

Per ogni stabilimento è stato individuato il codice fiscale dell'azienda di riferimento [8] considerando, per ogni anno analizzato, le variazioni della denominazione e delle attività (apertura, chiusura, variazione e trasformazione). Attraverso questi elenchi, uno per ogni anno, la Consulenza Statistica Attuariale dell'Istituto ha fornito i dati disponibili negli archivi INAIL sulle denunce di infortunio, dal 2017 al 2020 [9,10].

Molte delle aziende rilevate svolgono la propria attività in diversi stabilimenti, ma non tutti sono soggetti alla direttiva SEVESO. Per questo motivo ogni infortunio estratto dalla banca dati Inail è stato processato al fine di verificare se effettivamente l'incidente aveva avuto luogo in uno stabilimento SEVESO.

Le variabili utilizzate per identificare lo stabilimento di nostro interesse sono il codice fiscale, il numero di partita IVA, il comune di ubicazione dello stabilimento nel quale si è verificato l'infortunio.

I dati sono stati raccolti dal 2017 al 2020. Nell'inventario del Ministero dell'ambiente, ogni anno sono inclusi circa 1000 stabilimenti. Di questi, 743 hanno segnalato almeno un infortunio all'Inail nel periodo considerato. In altre parole, nella banca dati costruita per la specifica attività di ricerca il numero di stabilimenti che ha registrato infortuni è inferiore a quello dell'inventario poiché è stata rilevata solo l'informazione relativa alla comunicazione di almeno un infortunio all'Inail, secondo la legislazione italiana (la legge 19/2017 impone l'obbligo di notificare all'Inail i dati relativi agli incidenti che comportano un'assenza dal lavoro di almeno un giorno, escludendo il giorno dell'evento).

Un aspetto importante da sottolineare è che tutti gli stabilimenti nazionali soggetti al Decreto Legislativo n. 105/2015 sono stati oggetto di indagine; pertanto, il numero di stabilimenti non è un campione, ma rappresenta l'universo della popolazione.

Inoltre, sono stati presi in considerazione solo gli infortuni sul posto di lavoro e non quelli "in itinere" (ovvero un infortunio durante il tragitto casa-lavoro/casa).

Inoltre, per le analisi sono stati considerati gli infortuni *definiti positivi*, ossia gli infortuni riconosciuti a seguito di denuncia.

I dati riguardanti le segnalazioni di infortuni presentate all'Inail e relative alle attività tecniche e amministrative svolte negli stabilimenti sono stati analizzati considerando la *mission* istituzionale e in base a variabili specifiche. Quelle oggetto di studio sono:

- Professioni lavorative
- Gravità infortunio
- Deviazione e contatto
- Parte del corpo interessata
- Natura delle lesioni
- Età dell'infortunato
- Numero di giorni persi di lavoro

Per alcune delle variabili utilizzate in questo documento sono riportate di seguito le definizioni [11, 12]:

- **Professioni lavorative**

Le professioni lavorative fanno riferimento alla classificazione CP2011 dell'ISTAT [13]

- **Gravità infortunio**

La determinazione degli infortuni 'gravi' è avvenuta attraverso le chiavi interpretative contenute nei documenti Inail. Gli infortuni gravi comprendono quelli che hanno comportato un'assenza dal lavoro superiore a 40 giorni oppure che abbiano avuto riconosciuto almeno un grado di menomazione permanente o un esito "mortale".

- **Deviazione e Contatto**

I dati Inail fanno riferimento alla metodologia ESAW (European Statistics on Injuries at Work)[14] che consente di collezionare i dati sugli infortuni sul lavoro in modo che siano comparabili a livello all'interno dell'Unione Europea.

Le variabili ESAW sono state utilizzate per descrivere le caratteristiche dell'infortunio.

La "Deviazione" rappresenta l'ultimo evento che si discosta dalla norma e che porta all'incidente. Descrive, quindi, l'evento anomalo, ovvero la deviazione dal normale processo di lavoro. La "Deviazione" è l'evento che scatena l'incidente. La variabile "Contatto" rappresenta il contatto che ha ferito la vittima. Questo descrive come la vittima è stata ferita (trauma fisico o mentale) dall'"Agente Materiale" che ha causato l'infortunio. Se ci sono diversi "Contatti - Modi di Lesione", deve essere registrato quello che ha causato la lesione più grave.

Ai fini della caratterizzazione del settore Seveso/Pressione, dai dati ottenuti mediante la metodologia indicata, sono stati estrapolati quelli relativi agli stabilimenti che contemplano, nel processo produttivo, l'utilizzo di attrezzature in pressione. In particolare, nella tabella 1, sono riportate le attività considerate con le rispettive classi Ateco.

| Classe | Descrizione |
|--------|--|
| C 11 | Industria delle bevande |
| C 13 | Industrie tessili |
| C 17 | Fabbricazione di carta e di prodotti di carta |
| C 19 | Fabbricazione di coke e prodotti derivanti dalla raffinazione del |
| C 20 | Fabbricazione di prodotti chimici |
| C 21 | Fabbricazione di prodotti farmaceutici di base e di preparati |
| C 24 | Metallurgia |
| C 25 | Fabbricazione di prodotti in metallo (esclusi macchinari e attrezzature) |

Tabella 1. Codice classe ATECO 2007 e descrizione

Per una più agevole lettura dei dati, a partire dalla tipologia di attività indicata nell'inventario Seveso, gli stabilimenti sono stati suddivisi in quattro principali gruppi: *produzione e trasformazione di metalli e minerali, industria chimica, stoccaggio deposito e distribuzione, altre attività.*

2. Risultati

Attraverso l'ausilio di grafici e tabelle, vengono evidenziati i risultati più rilevanti dell'analisi settoriale effettuata e vengono sintetizzati alcuni degli esiti che si è ritenuto più opportuno puntualizzare.

I dati presentati si riferiscono al totale degli infortuni riferiti a n. 465 stabilimenti ed al periodo 2017-2020.

Rispetto alla classificazione ATECO, tra il 2019 e il 2020, gli infortuni definiti positivi subiscono una diminuzione accentuata nel C24 (metallurgia) e nel C25 (fabbricazione di prodotti in metallo). Tendenzialmente il C24 diminuisce nel corso di tutto il periodo analizzato, invece, il C25, rimane pressoché costante tra il 2017 e il 2018. Negli altri settori, non si riscontrano variazioni di rilievo nel corso degli anni. Ciò viene più marcatamente evidenziato nella suddivisione in macrosettori prevista dalla

metodologia descritta nei paragrafi precedenti, dove “Produzione e trasformazione di metalli e minerali” presenta un trend simile.

In riferimento alla natura della lesione, è la *contusione* ad essere la più frequente con il 28,9%, seguita dalla *lussazione, distorsione e distrazione* con il 21,9% e dalle *ferite* con il 16,4%. La modalità meno frequente risulta essere *Lesioni da agenti infettivi e parassitari* con lo 0,1%.

Le sedi del corpo maggiormente interessate dagli infortuni sono le *mani*, gli *arti inferiori* e il *viso*; tra l'altro tali infortuni presentano anche il grado di gravità maggiore. La *testa* è la sede in cui gli infortuni hanno causato il maggior numero di morti.

La variabile “contatto”, che descrive in che modo avviene la lesione, mostra come modalità con percentuale maggiore lo *sforzo fisico a carico del sistema muscolo scheletrico* (19%), che è anche quella che presenta conseguenze con gravità maggiore. In riferimento alla “Deviazione”, i *“movimenti scoordinati, i gesti intempestivi e inopportuni”* sono gli eventi più frequenti, 17,9%, seguito da *“passo falso, torsione di gamba o caviglia, scivolamento senza caduta”* con 13,3% e *“scivolamento o inciampamento con caduta di persona allo stesso livello”* con l'8,2%. La modalità in cui si registra una delle percentuali maggiori di infortuni gravi è *passo falso, torsione di gamba o caviglia, scivolamento senza caduta*.

La classe di età con la percentuale maggiore di infortuni è quella da *40 a 44 anni* (che presenta anche la percentuale maggiore di infortuni gravi). Per i mortali, su un totale di 8 decessi, la classe di età più coinvolta (con 3 decessi) è quella dai *45 ai 49 anni*.

Per quanto riguarda le professioni, dalla banca dati Inail, sono stati estrapolati i dati sugli infortuni occorsi ai lavoratori assicurati presso l'Istituto disponibili a partire dall'anno 2017.

L'analisi sugli infortuni condotta rispetto alle professioni coinvolte, evidenzia che la categoria con una percentuale maggiore di infortuni, pari al 40,8%, è *Conduttori di impianti industriali* che nella banca dati Inail è definita come “professioni che comportano la conduzione di impianti o macchinari industriali automatizzati che operano lungo l'intero processo produttivo o su singole fasi dello stesso nelle attività di estrazione e di trattamento dei minerali, di trasformazione e lavorazione dei metalli, del vetro, della ceramica, del legno e della carta e di produzione di derivati della chimica e del petrolio”. Rispetto agli anni precedenti vengono fornite nel lavoro anche informazioni sulla “tipologia del luogo” in cui è occorso l'infortunio (grafico 8) e la “tipologia di lavorazione” che si stava svolgendo durante l'accadimento dello stesso (grafico 9).

Per quanto riguarda la prima variabile sono le *officine e i laboratori* ad essere i più frequenti; per la seconda, invece, la modalità di accadimento più numerosa è *Produzione, trasformazione, trattamento - di ogni tipo*. In ultimo, il grafico 10 “Giorni persi di lavoro a causa infortunio” evidenzia che più dell'68,8% ricade al di sotto dei 40 giorni, che si ricorda è il limite di definizione degli infortuni non gravi.

| Professioni (CP2011) | n. | % |
|--|-------|-------|
| 7.1 - Conduttori di impianti industriali | 1.430 | 40,8 |
| 6.2 - metalmeccanici specializzati, installatori, manutentori di attrezzature | 576 | 16,4 |
| 7.4 - Conduttori di veicoli, di macchinari mobili e di sollevamento | 254 | 7,2 |
| 3.1 - Professioni tecniche in campo scientifico, ingegneristico e della produzione | 249 | 7,1 |
| 7.2 - Operai di macchinari fissi per la lavorazione in serie e operai montaggio | 224 | 6,4 |
| 8.4 Professioni non qualificate nella manifattura, estrazione minerali e costruzioni | 200 | 5,7 |
| 8.1 - Professioni non qualificate nel commercio e nei servizi | 152 | 4,3 |
| 6.3 – lavoratori specializzati della meccanica di precisione, artigianato ecc. | 102 | 2,9 |
| 4.3 - Impiegati addetti alla gestione amministrativa, contabile e finanziaria | 81 | 2,3 |
| 3.3 -Professioni per organizzazione, amministrazione, finanziarie e commerciali | 64 | 1,8 |
| 4.1 - Impiegati addetti alle funzioni di segreteria e alle macchine da ufficio | 49 | 1,4 |
| 2.1 - Specialisti in scienze matematiche, informatiche, chimiche, fisiche e naturali | 27 | 0,8 |
| 5.1 - Professioni qualificate nelle attività commerciali | 21 | 0,6 |
| 6.1 – Lavoratori specializzati industria estrattiva, edilizia e manutenzione edifici | 21 | 0,6 |
| Altre professioni | 55 | 1,6 |
| Totale | 3.505 | 100,0 |

Tabella 2. Infortuni definiti positivi per Professioni – anni 2017/2020 Fonte dati Inail

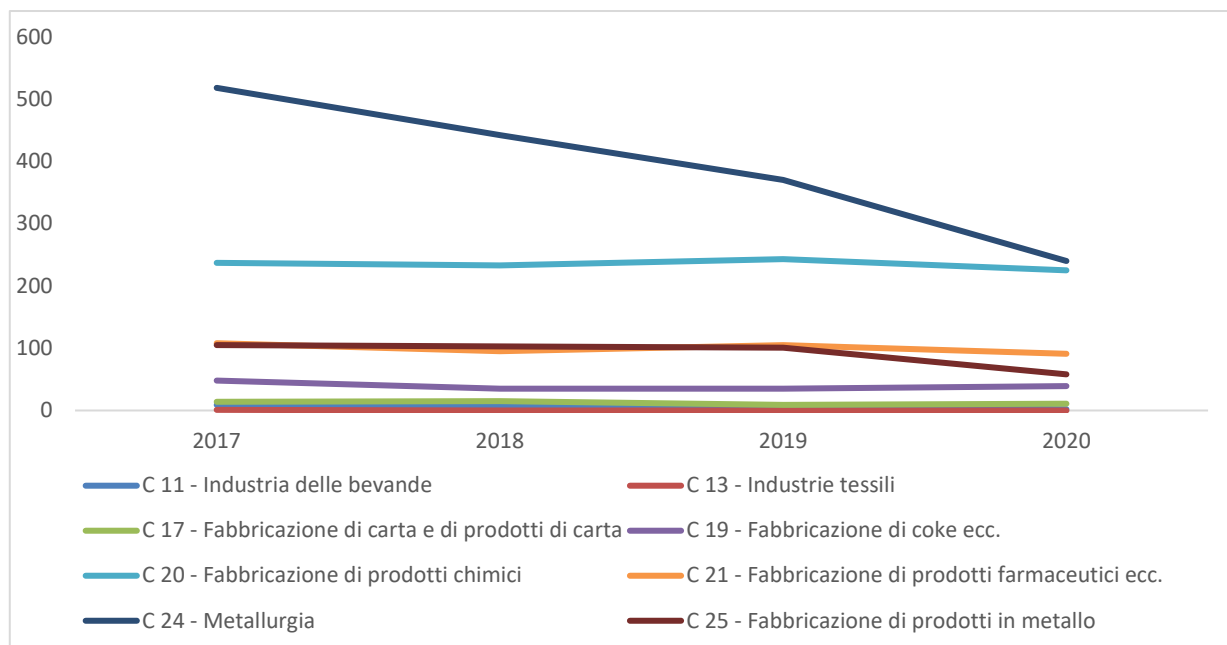


Grafico 1. Infortuni definiti positivi in aziende SEVESO che utilizzano apparecchi a pressione per settore ATECO - Valori assoluti anni 2017-2020 - Fonte dati INAIL

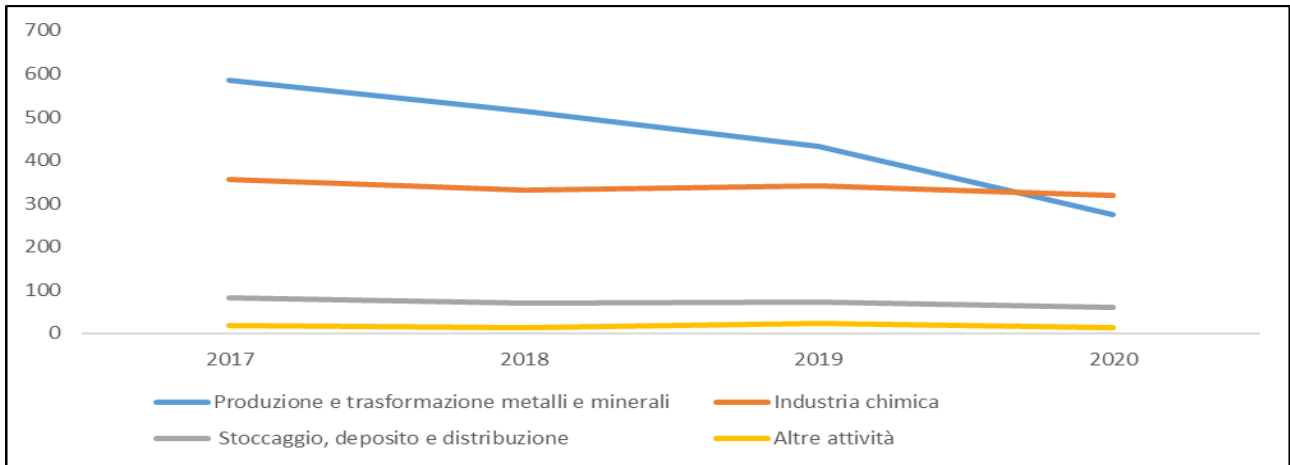


Grafico 2. Infortuni definiti positivi in aziende Seveso che utilizzano apparecchi a pressione per macrosettore - Valori assoluti anni 2017-2020 - Fonte dati INAIL

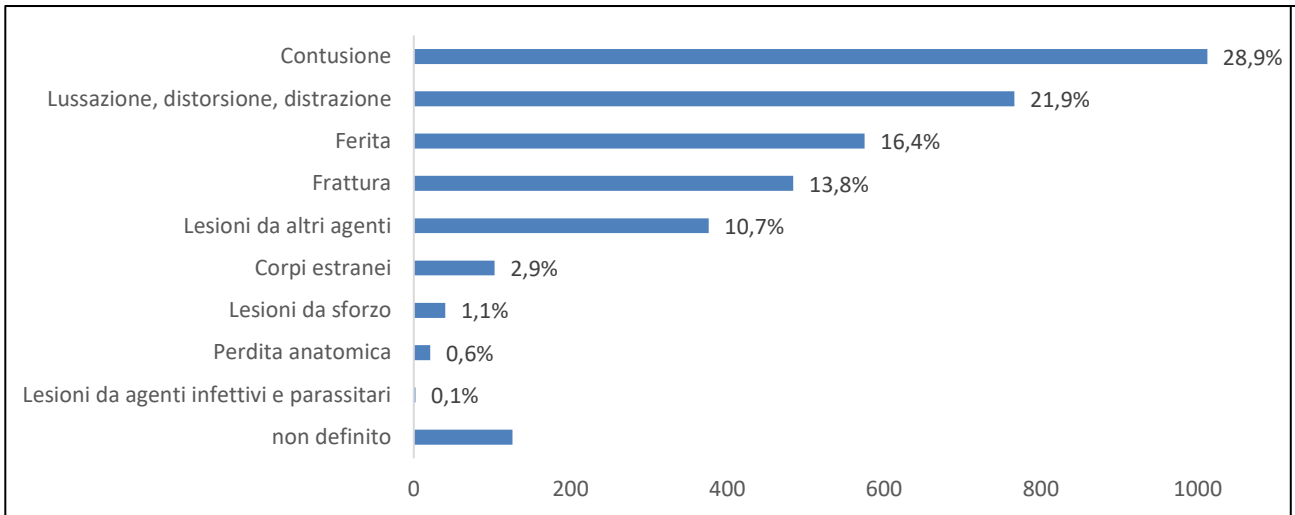


Grafico 3. Natura Infortunio definiti positivi in aziende Seveso che utilizzano apparecchi a pressione - anni 2017-2020 - Fonte dati INAIL

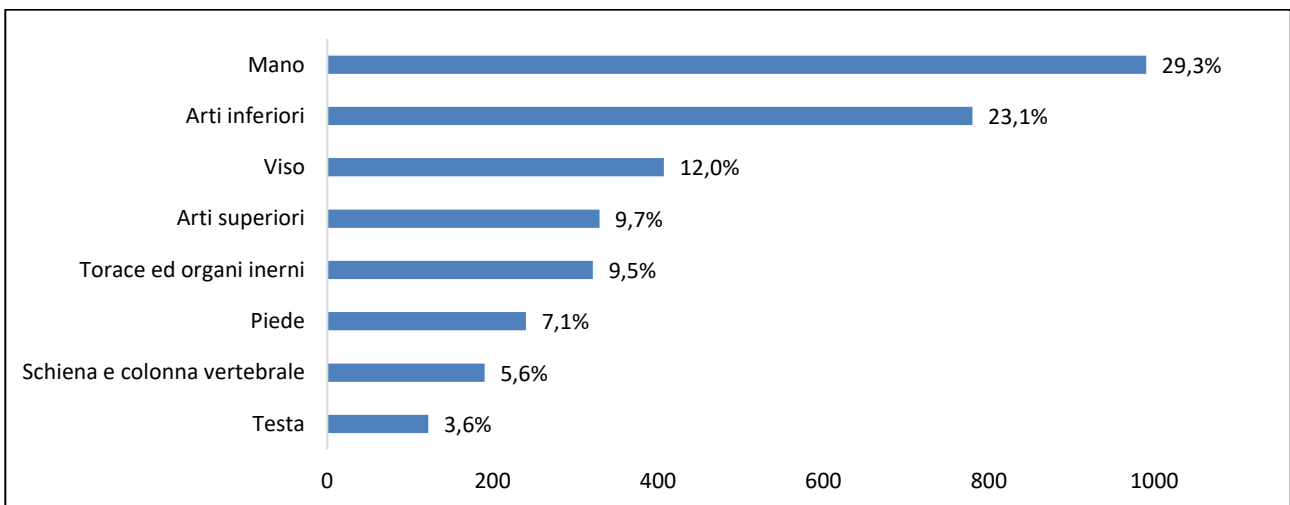


Grafico 4. Sede Infortunio definiti positivi in aziende Seveso che utilizzano apparecchi a pressione - anni 2017-2020 - Fonte dati INAIL

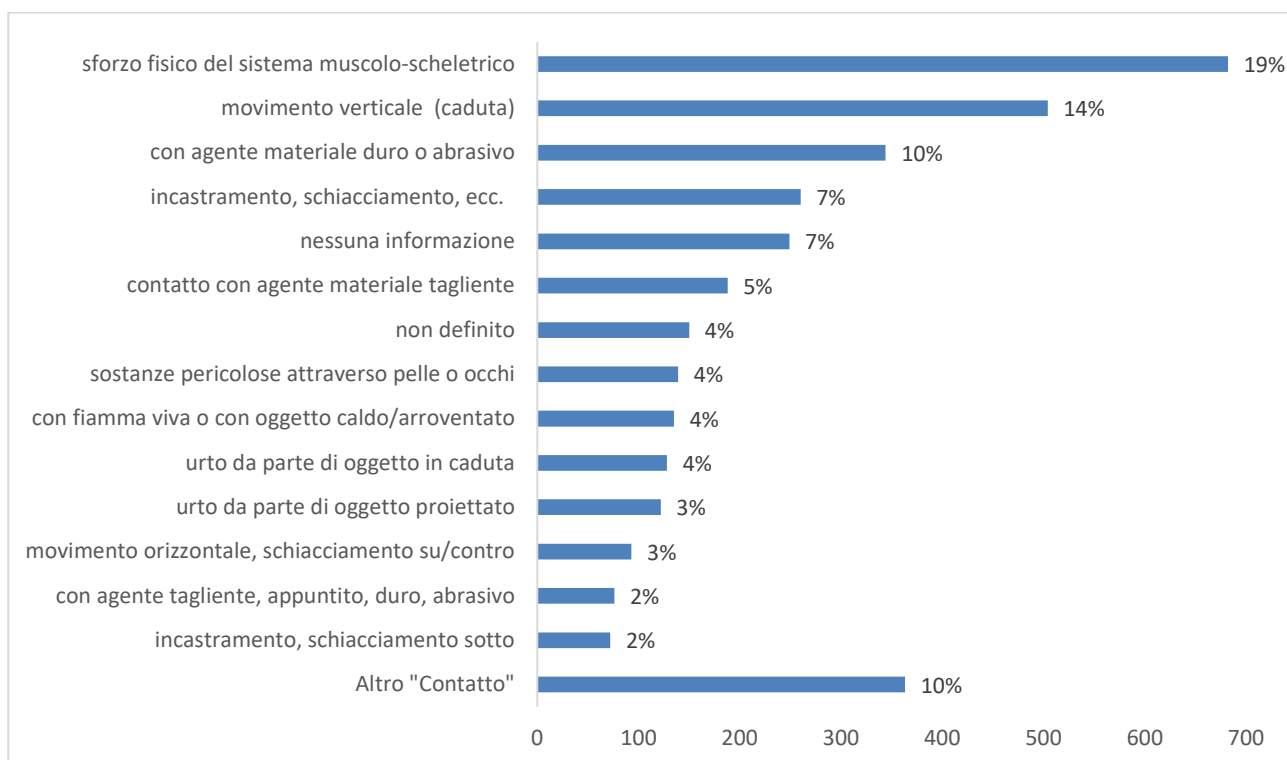


Grafico 5. Contatto Infortunio definiti positivi in aziende Seveso che utilizzano apparecchi a pressione - anni 2017-2020 - Fonte dati INAIL

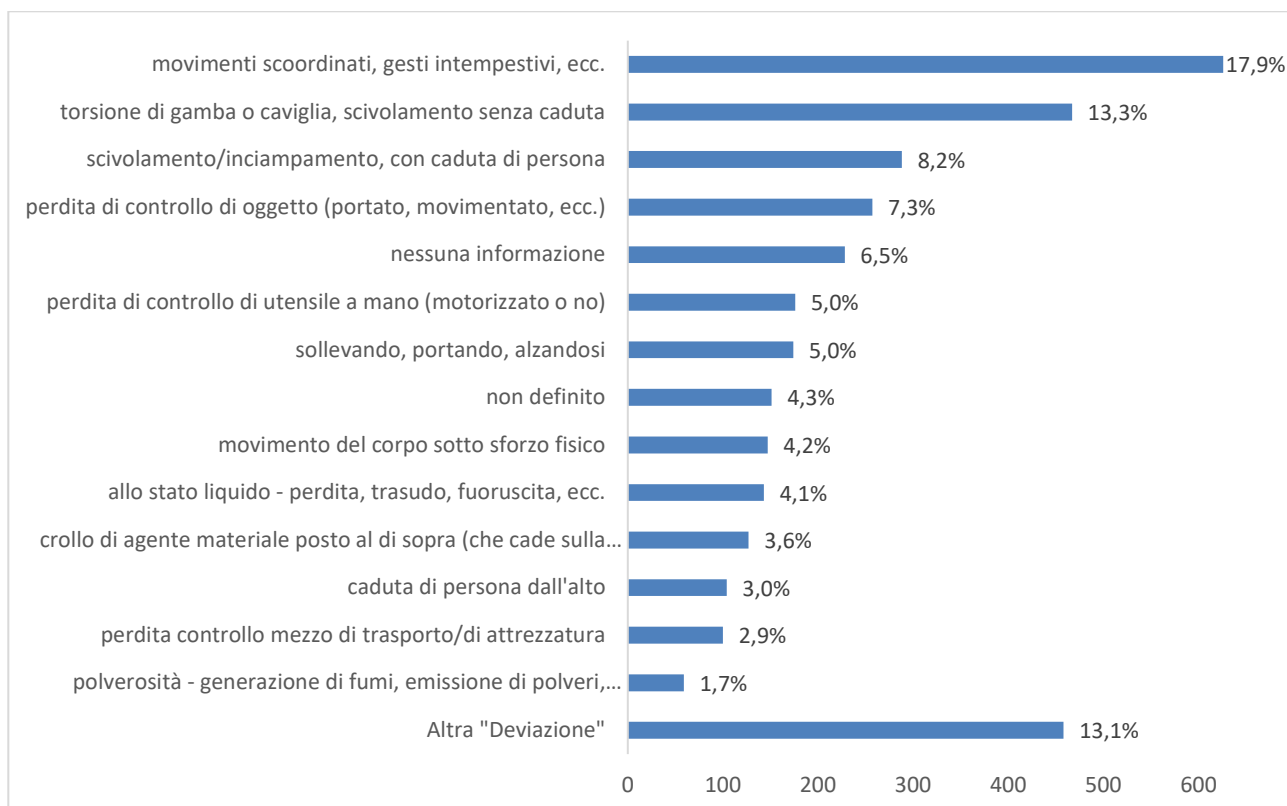


Grafico 6. Deviazione Infortunio definiti positivi in aziende Seveso che utilizzano apparecchi a pressione - anni 2017-2020 - Fonte dati INAIL

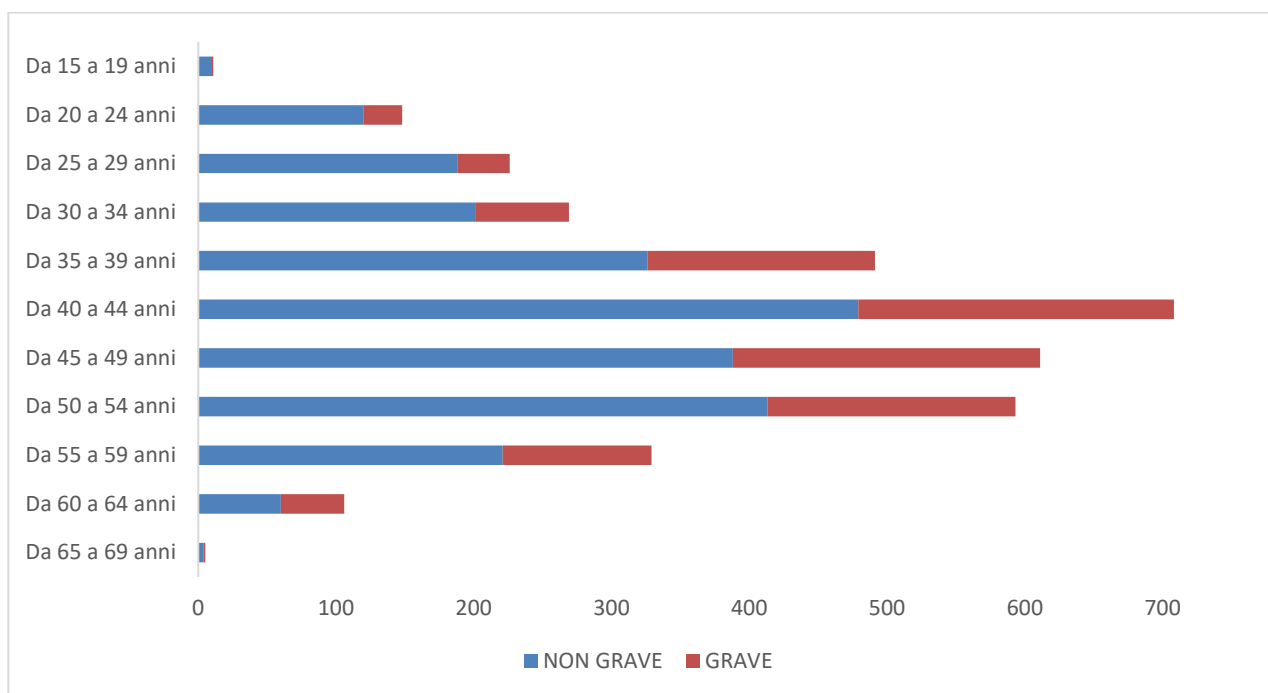


Grafico 7. Classe di età per gravità infortunio - Infortuni definiti positivi in aziende Seveso che utilizzano apparecchi a pressione anni 2017/2020 - Fonte dati Inail

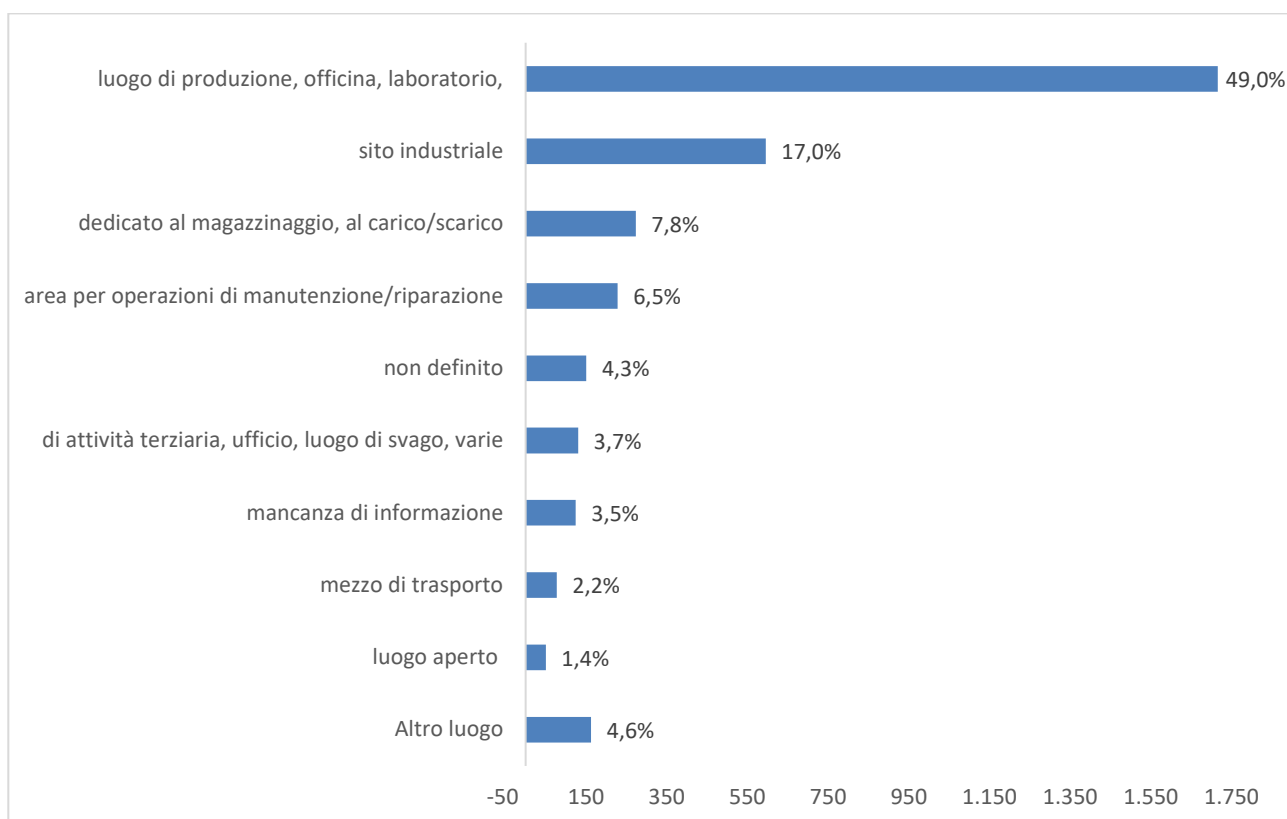


Grafico 8. Tipo luogo Infortunio definiti positivi in aziende Seveso che utilizzano apparecchi a pressione - Valori assoluti anni 2017-2020 - Fonte dati INAIL

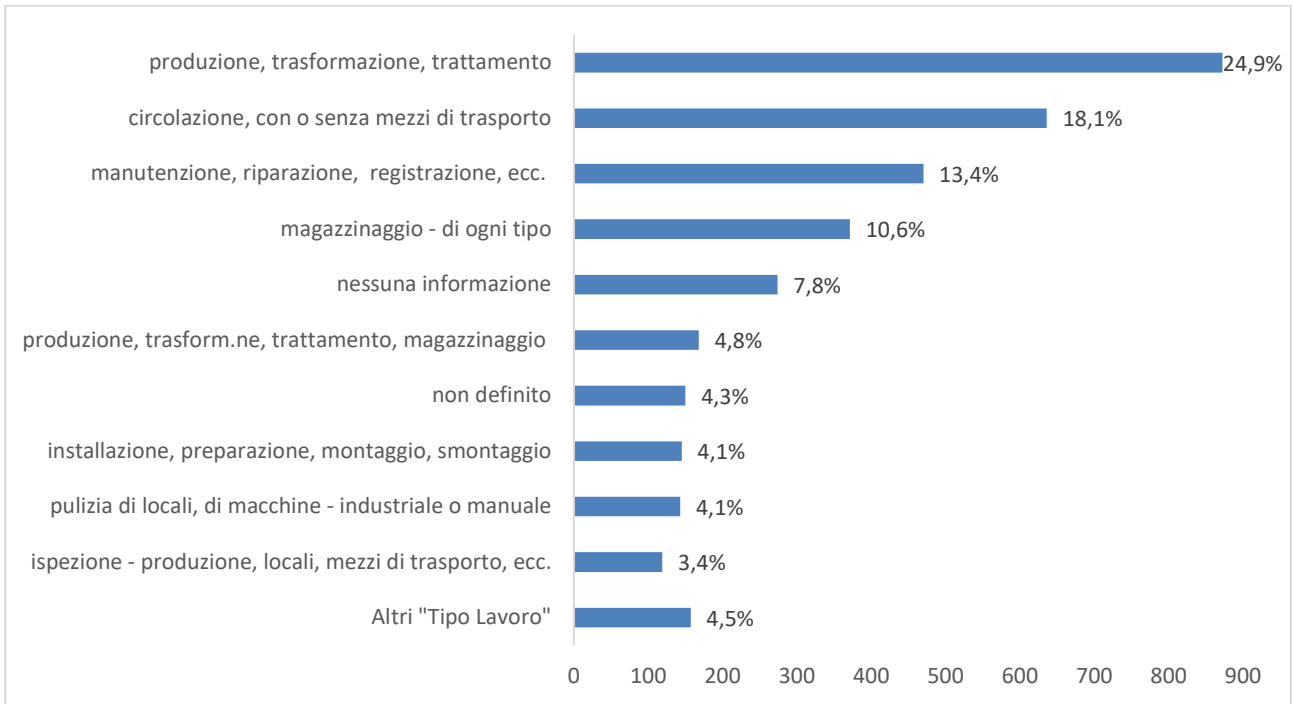


Grafico 9. Tipo Lavoro Infortunio definiti positivi in aziende Seveso che utilizzano apparecchi a pressione - Valori assoluti anni 2017-2020 - Fonte dati INAIL

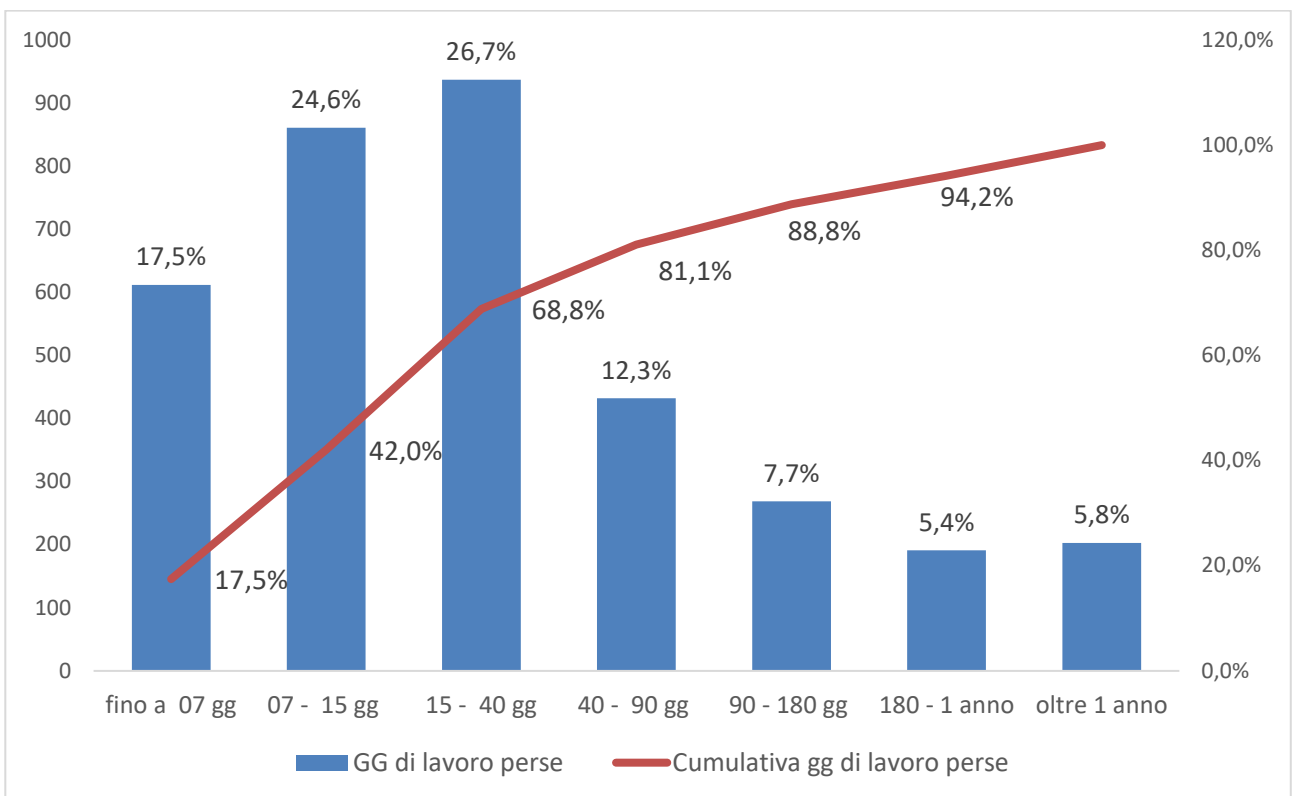


Grafico 10. Giorni persi di lavoro a causa infortunio - definiti positivi in aziende Seveso che utilizzano apparecchi a pressione - Valori assoluti anni 2017-2020 - Fonte dati INAIL

3. Conclusioni

Il database che è stato elaborato ai fini dello studio degli infortuni del Settore Seveso, attraverso l'applicazione della metodologia appositamente sviluppata, rappresenta l'unico strumento nazionale da cui si possono trarre informazioni in materia infortunistica. Oltre a quelle presentate nel lavoro, il database contiene altri dati come, ad esempio, la distribuzione regionale degli infortuni, il sesso e l'età degli infortunati.

I dati sono relativi al periodo 2017-2020 e, per il lavoro descritto nell'articolo, sono stati estratti solo quelli riferiti agli stabilimenti che simultaneamente sono soggetti alla normativa Seveso e prevedono, nel processo produttivo, l'utilizzo di attrezzature in pressione.

Dai dati emerge, per l'anno 2020, una generale diminuzione del numero degli infortuni riconducibile al periodo pandemico dovuto al Covid 19. Tale decremento è evidente soprattutto nel settore "Produzione e trasformazione di metalli e minerali". Va sottolineato che la banca dati è un utile strumento anche per elaborare strategie di prevenzione e per pianificare specifici ambiti di azione come l'istruzione e la formazione dei lavoratori. Questa analisi rappresenta, inoltre, il punto di partenza per studi futuri utili all'eventuale aggiornamento di linee guida, procedure e politiche efficaci e per migliorare la sicurezza e la salute dei lavoratori che svolgono le loro attività negli stabilimenti di Seveso a rischio di incidenti rilevanti.

Bibliografia

- [1] Simeoni C, Bragatto P, Cipolloni F, Morinelli G, Nebbioso A, Saputi G. Valutazioni statistiche sui lavoratori degli impianti a rischio di incidente rilevante SAFAP 14-15 Ottobre 2014 Roma.
- [2] Di Francesco A, Iacono P, Nebbioso A, Pirone A, Saputi G, Simeoni C, Vallerotonda MR. Settore Seveso: contesto normativo e caratterizzazione statistica degli infortuni. Inail Quaderni della Ricerca n.18, maggio 2020, ISBN 978-88-7484-621-4
- [3] Di Francesco A., Iacono P., Nebbioso A., Saputi G., Simeoni C., "Analisi congiunta dei settori "Seveso" e "Attrezzature a pressione": esame e approfondimento statistico dei dati istituzionali", Atti del Convegno sulla Sicurezza ed Affidabilità delle Attrezzature in Pressione, SAFAP 2021, Isbn 978-88-7484-709-9
- [4] C. Simeoni, A. Nebbioso, A. Di Francesco, P. Iacono, M.R. Vallerotonda e A. Pirone Injuries at work: a methodology for outlining and analyzing the "Seveso sector"; 33rd european safety and reliability conference (Esrel 2023), ISBN-13: 978-981-18-8071-1, ISBN-10: 981-18-8071-9, ©2023 ESREL2023 Organizers. Research Publishing, Singapore, doi: 10.3850/978-981-18-8071-1_
- [5] <https://www.istat.it/it/archivio/17888>
- [6] http://www.isprambiente.gov.it/files/pubblicazioni/rapporti/rapporto_181_2013.pdf

- [7] <http://www.minambiente.it/pagina/inventario-nazionale-degli-stabilimenti-rischio-di-incidente-rilevante-0>;
<https://www.rischioindustriale.isprambiente.gov.it/seveso-query-105/Default.php>.
- [8] Consultazione Banca Dati InfoCamere, <https://www.infocamere.it/accesso-alle-banche-dati>
- [9] <http://dati.INAIL.it/opendata/default/Qualidati/index.html>
- [10] <http://bancadaticsa.INAIL.it/bancadaticsa/login.asp>
- [11] Ciriello G, De Felice M, Mosca R, Veltroni M. Infortuni sul lavoro. Un modello di lettura (della numerosità) su "open data" dell'INAIL, Roma, INAIL, Quaderni di ricerca, 1° maggio 2013.
- [12] *Flussi informativi. Chiavi interpretative* Inail 2018
- [13] <https://professioni.istat.it/sistemainformativoprofessionioni/cp2011/>
- [14] Statistiche europee degli infortuni sul lavoro (ESAW). Metodologia. Edizione 2001 Pubblicazione UE

Caso studio per l'applicazione della metodologia RBI nell'industria chimica, in uno stabilimento con pericolo di incidente rilevante

E. Tassinario¹, G. Franchino¹, M. Scelza¹, V. Prete², A. Urso², A. De Palma³, A. Cicaterri⁴, L. Gallerano⁵

¹ ARKEMA S.r.l.

² Inail - Uot di Alessandria

³ Inail - Uot di Venezia

⁴ Inail - Uot di Roma

⁵ Inail - Uot di Milano

Abstract

L'azienda, oggetto della presente memoria, avviata nel 1976 è specializzata nella produzione di perossidi organici utilizzati come additivi nella produzione di polimeri ed elastomeri. Lo stabilimento, a rischio di incidente rilevante, è caratterizzato dall'impiego di un elevato numero di sostanze, da processi chimici diversificati, da tubazioni di processo e da apparecchiature "statiche" quali serbatoi reattori etc. gran parte delle quali risalgono ai tempi della costruzione dello stabilimento.

La crescente necessità degli stabilimenti chimici di raggiungere livelli sempre maggiori di sicurezza e affidabilità ha favorito l'implementazione di piani di manutenzione sempre più complessi e supportati da piani di ispezione basati sull'analisi del rischio.

Questo approccio consente, rispetto al metodo tradizionale delle ispezioni basate sul tempo, la comprensione della vita utile di ogni singola attrezzatura permettendo così alle aziende di prendere misure mirate al contenimento del rischio ottimizzando le risorse disponibili.

La presente relazione ha lo scopo di illustrare l'implementazione e la personalizzazione della metodologia RBI descritta nello standard API 581 all'interno di un'industria chimica assoggettata al d.lgs. 105/2015 di soglia superiore (Seveso III).

Keywords: tubazioni, RBI, sicurezza impianti.

1. Introduzione

Lo stabilimento, facente parte di un gruppo chimico internazionale, oggetto della presente memoria è specializzato nella produzione di perossidi organici; in particolare, i processi sono di tipo continuo e sono stati sviluppati negli anni '70 da una precedente proprietà.

La produzione dei perossidi organici viene ottenuta attraverso reazioni chimiche molto complesse con l'utilizzo di una grande varietà di materie prime che, interagendo tra loro, formano sostanze intermedie spesso responsabili del degrado delle tubazioni, fenomeni peraltro poco trattati nella letteratura di riferimento.

L'ultima ispezione SGS iniziata nell'anno 2022 ed ancora in corso è stata condotta con le seguenti finalità:

- condurre un esame pianificato e sistematico dei sistemi tecnici, organizzativi e di gestione applicati nello stabilimento, al fine di verificare che il gestore abbia attuato quanto da lui predisposto per la prevenzione degli incidenti rilevanti e per la limitazione delle loro conseguenze;
- verificare la conformità delle azioni correttive messe in atto per ottemperare alle prescrizioni/raccomandazioni impartite a seguito di precedenti ispezioni.

Dal confronto con l'azienda durante l'ispezione SGS è emerso che la metodica RBI, per l'analisi del piping, è stata applicata a tutte le unità produttive, rendendo operativo il progetto di integrità meccanica "Mechanical Integrity" avviato nel 2015 con lo scopo di definire delle priorità per i controlli delle tubazioni di impianto, molto numerose in stabilimento.

Il "Programma di Mechanical integrity" è stato formalizzato nella omonima procedura in cui sono elencate le istruzioni operative/procedure di riferimento per le diverse tipologie di ispezioni (ispezioni tecniche - controlli visivi dell'operatore, RBI, ispezione fabbricati e pipe-rack).

Da quanto sopra esposto è emersa la necessità di porre una grande attenzione nella raccolta delle varie esperienze operative finalizzate ad una corretta identificazione dei meccanismi di guasto.

L'impianto preso in esame è composto da quattro unità produttive denominate U100, U200, U250 e U300 ed è caratterizzato da un elevato numero di tubazioni di processo (2.850) e di apparecchiature "statiche" (438), di cui la maggior parte risalente alla prima costruzione dell'impianto avvenuta negli anni '70.

Dato l'elevato numero di items presenti in stabilimento, negli anni si è fatta sempre più pressante la necessità di dotare l'attività di un programma di ispezione che gestisca in modo efficace la valutazione del rischio di guasto.

Per integrare il programma di Mechanical Integrity si è presa ispirazione dalla metodologia (API 581) denominata Risk Based Inspection (RBI) che rappresenta una delle più comuni e riconosciute pratiche per la valutazione del rischio negli impianti petroliferi definito come il prodotto tra la probabilità che avvenga un rilascio dei prodotti di processo contenuti all'interno di un'attrezzatura e la conseguenza che ne potrebbe scaturire.

$$\text{Rischio} = \text{Probabilità} * \text{Conseguenza}$$

L'implementazione del programma di Mechanical Integrity utilizzando il metodo RBI si è resa necessaria per il conseguimento delle seguenti finalità:

- Definire, quantificare e classificare il rischio di malfunzionamento delle apparecchiature di processo per individuare gli elementi più importanti in tale impianto. Si è osservato che una grande percentuale del rischio unitario totale è concentrata in una percentuale relativamente piccola degli elementi di impianto da qui è nata la necessità di rivedere il piano di ispezione concentrandosi su quei componenti caratterizzati dal rischio più elevato.
- Ridurre progressivamente la probabilità e le conseguenze di un'avaria assegnando maggiori risorse alle ispezioni per le attrezzature ad alto rischio.
- Ridurre il rischio globale mediante interventi tecnici di manutenzione e riqualificazione delle attrezzature.

I controlli previsti sulle tubazioni, di tipo visivo vengono effettuati da personale interno o affidati a ditta esterna qualora necessitino di controlli non distruttivi, vengono valutati sulla base della specifica tubazione e del tipo di corrosione prevista. Lo studio è stato coordinato dalle funzioni tecniche dello stabilimento con il supporto della direzione tecnica centrale del gruppo e con il contributo e confronto con i tecnici Inail delle U.O.T. interessate durante le attività di ispezione e verifica ed in commissione SGS.

L'unità denominata 200 essendo la più critica in quanto soggetta a fenomeni di corrosione e caratterizzata da una notevole complessità nell'identificazione dei meccanismi di danno è stata la prima ad essere assoggettata ad analisi RBI.

Visti i risultati conseguiti con l'analisi RBI sulle tubazioni tale metodo di controllo è stato esteso anche alle apparecchiature "statiche" (serbatoi, scambiatori, colonne, reattori etc.).

A seguito dell'adozione di detta metodologia si è ritenuto opportuno implementare la procedura SGS "Procedura gestione attrezzature tubazioni ed insiem a pressione" che gestisce tali apparecchiature descrivendone le modalità di modifica/riparazione con particolare riferimento alle tubazioni tenendo anche conto degli adempimenti connessi agli obblighi di cui al d.m. 329/04.

Nel relativo scadenziario indicante le date previste per le verifiche periodiche e di integrità, con un alert per quelle in scadenza nel mese, vengono riportate tutte le apparecchiature presenti in stabilimento soggette a verifiche periodiche a norma di legge (es. tubazioni PED, valvole di sicurezza) nonché quelle identificate nel Piano di manutenzione meccanica-edile.

2. Descrizione dello sviluppo della metodologia di analisi RBI

Il diagramma di flusso rappresentato in Figura 1 riassume il processo metodologico utilizzato per l'analisi RBI delle tubazioni; nei paragrafi successivi verranno descritte le fasi principali inerenti l'acquisizione dei dati necessari per il software di gestione che consente la monitorizzazione continua dell'impianto ai fini del contenimento del rischio.

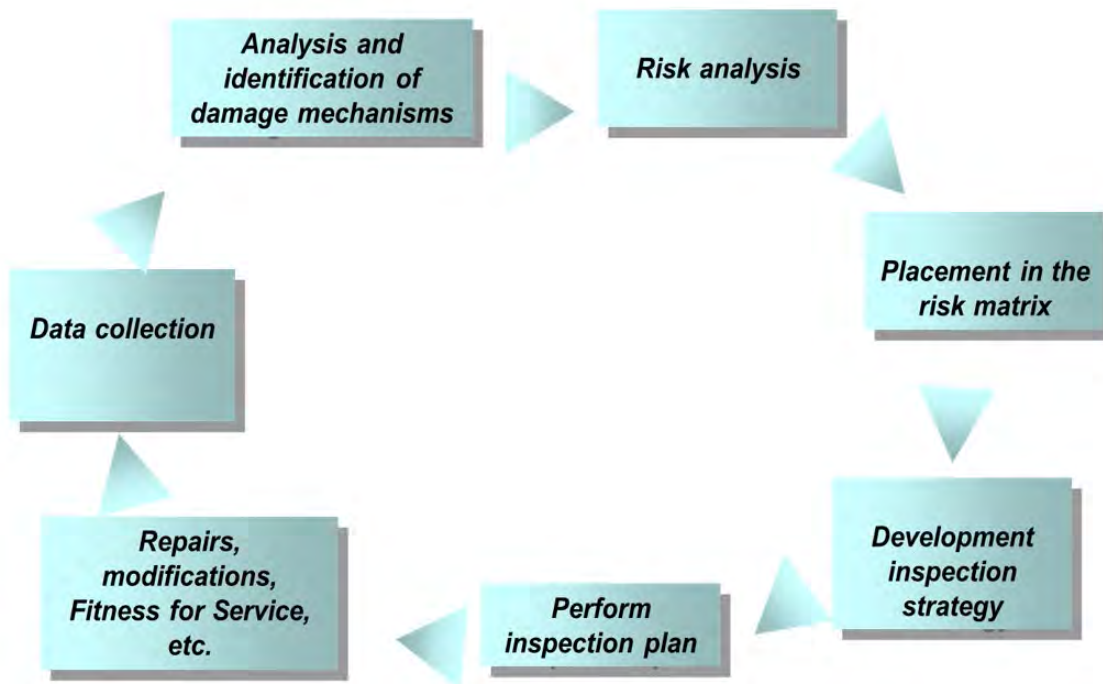


Figura 1. Diagramma di flusso della metodologia RBI.

2.1 Raccolta dati

Il progetto ha avuto inizio con l'estrapolazione di tutte le informazioni necessarie all'analisi di rischio e la creazione di una banca dati contenente una descrizione completa di tutti gli items, tale attività ha richiesto un grosso dispendio sia di tempo che di risorse in quanto gli obiettivi finali erano di rendere più precisa e ordinata possibile la raccolta dei dati per agevolare la consultazione sia nelle fasi di analisi che per le successive ulteriori valutazioni.

La raccolta delle informazioni ha coinvolto diverse funzioni di stabilimento (ufficio tecnico, manutenzione, processo, produzione, HSE) e si è articolata come di seguito descritto.

Essendo uno dei requisiti essenziali del progetto rappresentato dall'affidabilità dei dati pertanto si rende necessario riverificare e aggiornare in campo 49 P&ID di processo, inoltre, previo reperimento di tutti i manuali e delle specifiche costruttive delle tubazioni, predisporre delle schede tecniche con le caratteristiche meccaniche di ogni singola tubazione: item identificativo, materiale di costruzione, diametro, classe tubazioni secondo le norme, tipologia di isolamento, specifiche di verniciatura, estensione della linea e volume totale.

Dovendo classificare ogni item secondo le criticità di sicurezza per ogni singolo fluido valutando natura del fluido di processo, concentrazioni, pressione, temperatura, stato del fluido, classificazione dei rischi associati al fluido secondo le metodologie

imposte dagli standard di sicurezza e di produzione del gruppo si è reso necessario effettuare l'analisi di processo con l'identificazione delle condizioni di esercizio.

Tutte le informazioni necessarie al suo funzionamento sono state inserite in un software di manutenzione, al fine di conoscere lo storico dell'attrezzatura: prima verifica di esercizio, eventuali modifiche o riparazioni, risultanze relative alle verifiche periodiche e efficacia degli interventi effettuati sui meccanismi di danno dominanti, con l'identificazione dei "process loop".

La metodologia adottata prevede la creazione di circuiti omogenei dal punto di vista delle condizioni di processo (temperatura, pressione, flusso), la natura del fluido (composizione e stato), i materiali di costruzione e la presenza o meno di organi di intercetto automatici.

Ogni Loop risulta caratterizzato da un volume proprio che sarà utilizzato nel calcolo delle conseguenze.

In Figura 2 è rappresentato un esempio di loop: esso è costituito dagli apparecchi E3322, E3331, D3321, K3321 e dalle tubazioni di collegamento risultando così individuati e analizzati un numero pari a 670 loops omogenei.

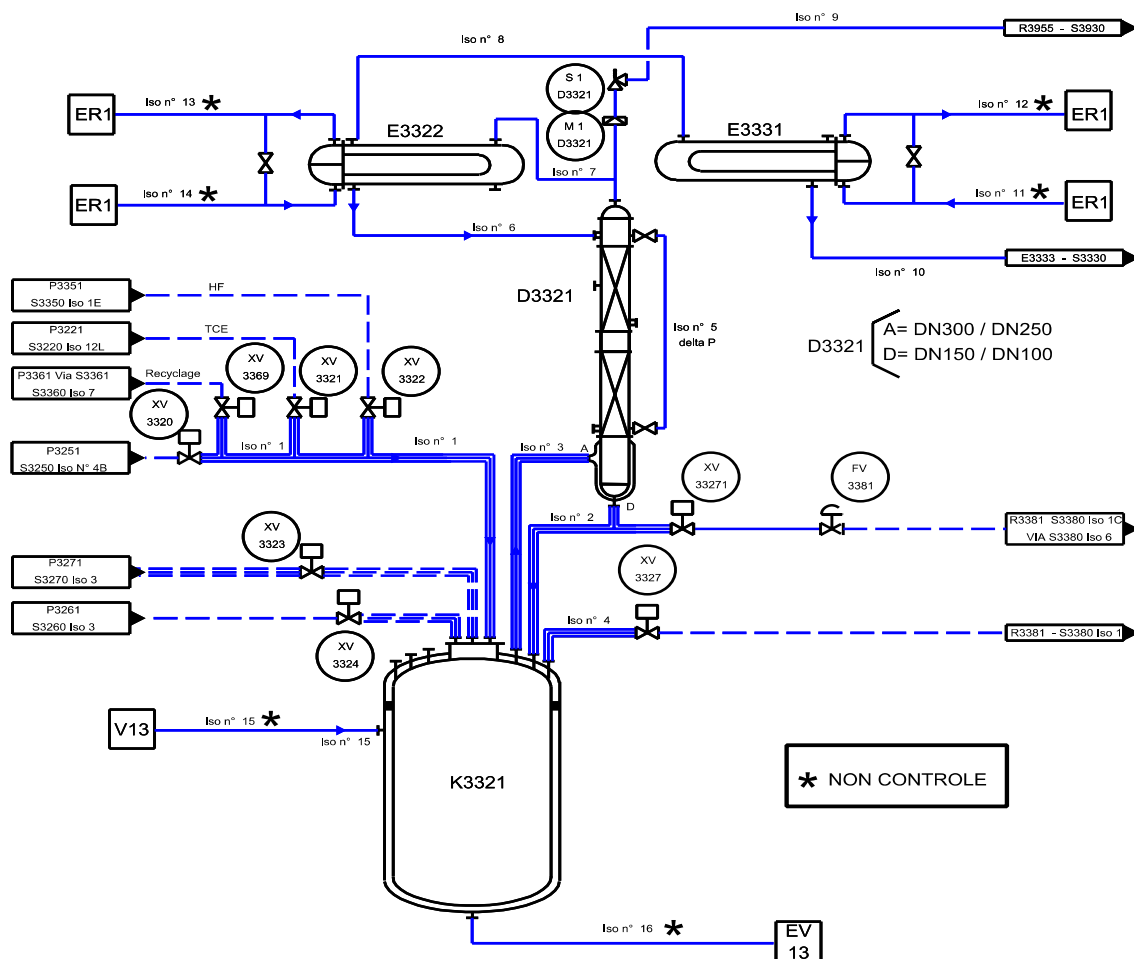


Figura 2. Esempio di loop omogeneo

2.2 Analisi ed Identificazione dei meccanismi di guasto

L'elemento più critico della valutazione consiste nell'individuazione dei potenziali meccanismi di danno e le zone in cui si localizza il degrado.

La comprensione e l'analisi di quanto sopra è essenziale per:

- Favorire la corretta valutazione probabilistica sulla vita dei componenti.
- Identificare la corretta tecnica di ispezione.

Le modalità di danneggiamento sono state esaminate attraverso una banca dati specifica, la quale aggiunge ai meccanismi trattati dalla norma quelli specifici dello stabilimento nonché tutte le esperienze maturate nel panorama internazionale dall'intero Gruppo aziendale.

L'attività è stata supportata da un esperto di corrosione della direzione tecnica centrale dell'azienda, che ha avuto il compito di analizzare ogni singolo loop e fornire i corretti parametri di calcolo al software per l'analisi probabilistica; sono stati così identificati i meccanismi di danno dominanti e quelli secondari consentendo lo sviluppo di un piano di ispezione adeguato.

2.3 Il "Risk Assessment" e la matrice di rischio

La metodologia adottata consente di identificare il coefficiente di rischio sulla base della combinazione tra la probabilità e le conseguenze derivanti dalla perdita di contenimento di un fluido di processo (Figura 3).

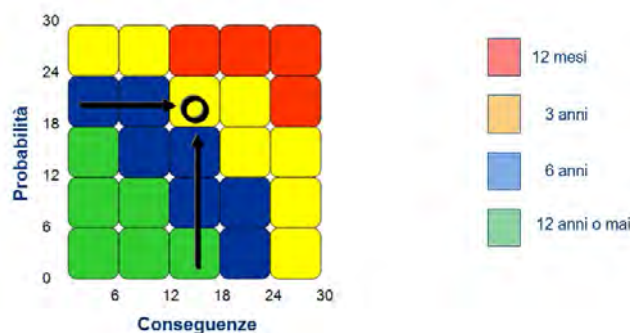


Figura 3. Matrice di rischio

Per il calcolo delle probabilità tale metodologia prevede un processo valutativo che tenga conto dell'azione dei meccanismi di danno nel tempo, delle condizioni e delle risultanze rilevate nelle ispezioni pregresse nonché dell'efficienza con la quale queste ispezioni sono state effettuate; ad esempio, se il meccanismo di danno causa sul materiale danni dovuti a *stress corrosion cracking* un'indagine spessimetrica ad ultrasuoni non fornirà risultati esaurienti e pertanto non produrrà effetti di mitigazione nel calcolo delle probabilità.

Nel caso di corrosione uniforme su un'attrezzatura coibentata se la rimozione dei coibenti è avvenuta solamente nei punti di misura, impedendo così la valutazione visiva di tutte le superfici, l'efficienza dell'ispezione sarà minore e la metodologia ne terrà conto.

Per meglio favorire la corretta interpretazione dei dati, la metodologia restituisce la matrice nelle condizioni attuali e nelle condizioni potenziali (Figura 4) risultando molto conservativa nel caso di tubazioni mai ispezionate oppure con ispezioni poco efficienti.

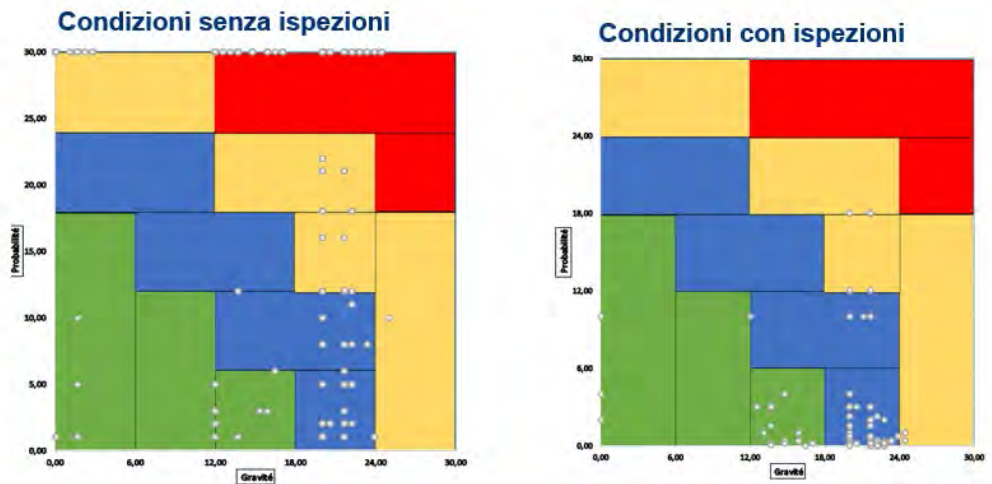


Figura 4. Matrice di rischio attuale e potenziale

L'analisi delle conseguenze di un rilascio di un fluido di processo riguarda tematiche di sicurezza salute e ambiente, nella metodologia adottata si tengono in considerazione i seguenti aspetti:

- Pressione, temperatura e stato del fluido;
- Volume complessivo del loop;
- Energia rilasciata durante la perdita;
- Classificazione di pericolosità del fluido.

La matrice di rischio creata rende possibile la successiva creazione della tabella di rischio equivalente che associa ad ogni livello di rischio una frequenza ispettiva (colonna sinistra della *Figura 3 che associa un colore alla frequenza ispettiva*). Le frequenze suggerite dalla metodologia non sostituiscono quelle previste dalla vigente normativa.

2.4 Sviluppo del piano di ispezione e piano d'azione

L'elemento più critico della valutazione consiste nell'individuazione dei potenziali meccanismi di danno e dei siti di danneggiamento; la comprensione delle minacce attive e potenziali all'integrità delle attrezzature è vitale per il successo del progetto RBI.

Il piano di ispezione focalizzato sulle apparecchiature ad alto rischio è stato progettato per rilevare se il singolo componente sia ancora in grado di svolgere la sua funzione ovvero debba essere sostituito.

Il concetto di efficienza dell'ispezione entra a far parte del processo di gestione del rischio stesso, con l'accumularsi dei danni durante il funzionamento dell'attrezzatura l'efficacia dell'ispezione riveste importanza sempre maggiore pertanto è stato messo a punto un piano di ispezione per ogni singola tubazione che tenga conto dei diversi meccanismi di danno e dei punti critici in cui essi si manifestano; inoltre ogni ispezione è corredata di uno schema isometrico con evidenziati i punti di ispezione (Figura 5).

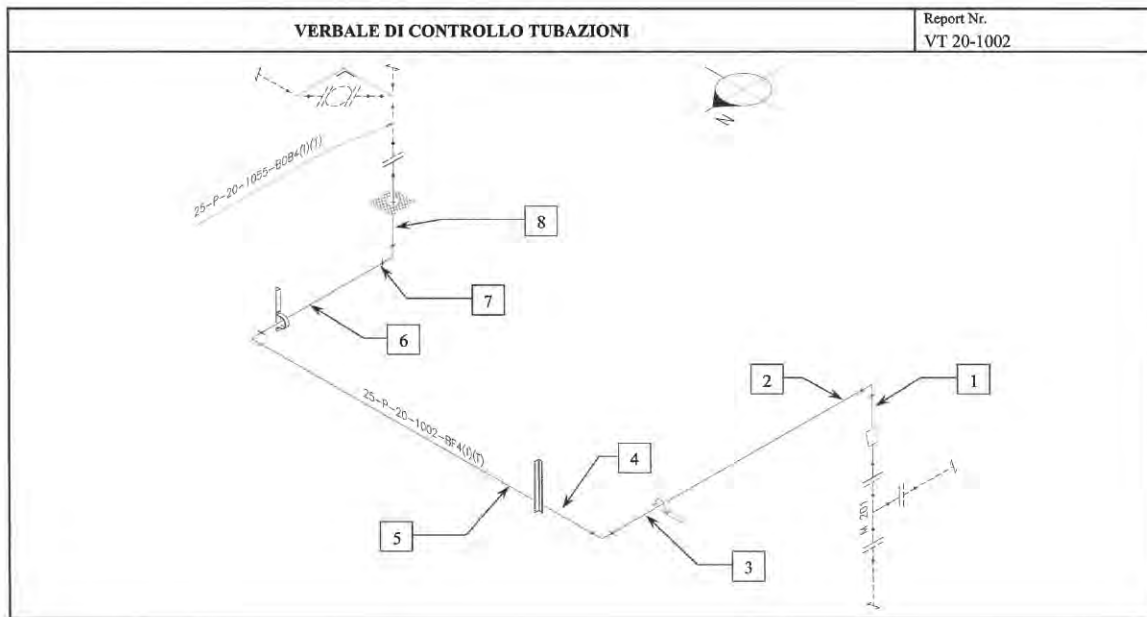


Figura 5. Schema isometrico di un piano di ispezione.

Dall'attuazione del progetto RBI sono state eseguite complessivamente 2111 ispezioni le quali hanno evidenziato le seguenti principali problematiche:
Difetti di corrosione (Figura 6):



Figura 6. Esempio di corrosione uniforme sotto l'isolamento.
Difetti di fabbricazione dovuti a riparazioni o processi costruttivi non adeguati (Figura 7)



Figura 7. Problema di fabbricazione.

Difetti di installazione dovuti al fatto che alcune vecchie tubazioni sono state realizzate non in accordo né con le norme costruttive né con la regola dell'arte (Figura 8).



Figura 8. Difetto di installazione.

Difetti di compatibilità dei materiali; grazie al contributo degli esperti di corrosione della direzione tecnica centrale si è riscontrato che i materiali di alcune tubazioni presentavano incompatibilità chimiche e funzionali.

Sulla base dell'analisi delle criticità è stato così possibile redigere un programma di sostituzione delle tubazioni che ha contribuito e contribuirà alla riduzione progressiva del rischio; questo ha permesso ad oggi la sostituzione di 172 tubazioni di processo.

3. Lo strumento di gestione

Tutta l'attività è supportata da un software di gestione di proprietà del gruppo, in grado di gestire il flusso logico della valutazione RBI (Figura 1) oltre a contenere il database tecnico, il risultato dell'analisi e il calcolo del rischio sotto forma di matrice. Tale programma informatico aiuta a gestire, tracciare ed eventualmente agire (tramite coefficienti assegnati, costanti e calcolo probabilistico), sull'enorme quantità di dati provenienti dalle attività di gestione e controlli includendo tutti i meccanismi

di danneggiamento e i fattori di rischio, prevedendo la corrosione, pianificando le ispezioni e consentendo il follow-up delle azioni di miglioramento.

4. Conclusioni

Lo studio nasce dall'esigenza dell'azienda di migliorare gli standard di sicurezza dei propri impianti utilizzando sempre più strumenti efficaci ed efficienti per un continuo miglioramento del Sistema di Gestione della Sicurezza.

Il progetto ha avuto un impatto iniziale rilevante in termini di risorse economiche ed impegno di risorse umane attraverso gruppi di lavoro dedicati al suo sviluppo e grazie alla collaborazione dei tecnici INAIL delle varie U.O.T. interessate, alle linee guida in merito alle tematiche dell'invecchiamento delle attrezzature nonché a seguito di interventi di omologazione/messa in servizio/attività di controllo della SGS ad oggi si evidenziano i seguenti benefici:

- Aggiornamento e incremento della documentazione (P&ID, classi di tubazioni, nuovi disegni isometrici, identificazione di tubazioni non necessarie ecc.).
- Procedure di manutenzione all'interno dei manuali riferiti ad ogni attrezzatura, con la registrazione degli interventi sotto responsabilità di personale dedicato e formato.
- Interventi di monitoraggio relativi all'invecchiamento verifiche con PND etc.
- Miglioramento dei piani di manutenzione supportati da ispezioni basate sul rischio
- Ottimizzazione delle risorse economiche di manutenzione.
- Aumento della sicurezza e dell'affidabilità degli impianti.
- Identificazione di materiali potenzialmente non compatibili con alcuni fluidi di processo.
- Accrescimento delle competenze tecniche delle figure componenti il sistema di gestione di sicurezza dello stabilimento.

5. Bibliografia

[1] Decreto Legislativo 26 giugno 2015, n. 105 "Attuazione della direttiva 2012/18/UE relativa al controllo del pericolo di incidenti rilevanti

[2] American Petroleum Institute (API). API Publication Base Resource Document 581 -Risk-Based Inspection; 2000.

[3] American Petroleum Institute (API). API Publication 581 - Risk-based Inspection Methodology; 2016.

[4] UNI EN 16991:2018 "Risk-Based Inspection"

Analisi dei rischi emergenti connessi con la trasformazione digitale: il progetto DRIVERS

R. Setola¹, B. Fabiano², S. Ansaldi³

¹ Università Campus Bio-Medico di Roma

² Università di Genova

³ Inail - Dit

Abstract

Nei prossimi anni la progressiva spinta alla digitalizzazione di tutte le attività, unitamente alla transizione energetica ma soprattutto ai mutamenti indotti dai cambiamenti climatici, ci porrà di fronte a scenari di rischio “unknown” con potenziali significativi impatti per la sicurezza degli impianti produttivi. Queste considerazioni impongono lo sviluppo di soluzioni in grado di identificare e monitorare quei fattori che posso accelerare (ovvero frenare) l’insorgenza di tali rischi emergenti. Per rispondere a questa esigenza il progetto DRIVERS sta realizzando una piattaforma di Safety Information per supportare l’operatore nell’evidenziare tempestivamente l’insorgenza di fenomeni di rischio (early-warning) e nell’aiutarlo a valutare la propria esposizione.

A tal fine il progetto ha identificato i fattori maggiormente critici per gli aspetti di safety connessi con i cambiamenti climatici, la transizione energetica e la trasformazione digitale. In particolare, per quest’ultimo aspetto è emersa la rilevanza del tema della cybersecurity e della necessità di avere strumenti in grado di abbinare ad una conoscenza puntuale degli elementi che costituiscono lo strato di Operational Technology (OT) dell’impianto con quelle che sono le vulnerabilità note correlandole al relativo livello di rischio. A tal fine nell’ambito del progetto è in fase di sviluppo una soluzione automatizzata che consente di fare l’inventario della rete OT e di verificare attraverso l’utilizzo di apposite API l’eventuale presenza di vulnerabilità note il cui grado di pericolosità è determinato usando la metrica CVSS (Common Vulnerability Scoring System).

Keywords: Cybersecurity, Operational Technology, OSINT, process and occupational safety.

1. Introduzione

Il Financial Times¹ in un suo recente articolo ha utilizzato la metafora della *tempesta perfetta* per dare un’idea di quelli che sono i “nuovi” rischi che si stanno affacciando nello scenario industriale (e non solo in quello). L’articolo evidenzia come si

¹ <https://www.ft.com/content/d4ab879e-6fcd-40a6-9acf-4c60b78c6cbb>

concentrano e si sommano gli effetti legati a tre fenomeni, in parte correlati, che cambieranno in modo significativo il nostro modo di vivere con impatti significativi su specifiche filiere industriali. In particolare, l'articolo si riferisce a quelli che sono i rischi indotti dalla **trasformazione digitale**, dalla **transizione energetica** e dai **cambiamenti climatici**. Tre eventi hanno in comune il fatto di essere fenomeni a livello globale, di avvenire su scale temporali estremamente ridotte (quanto meno per ciò che riguarda la manifestazione degli effetti negativi) ma, soprattutto, di essere fenomeni nuovi. Fenomeni per i quali non possiamo, se non in piccola parte, ricorrere all'esperienza passata e all'analisi delle serie storiche. Per tale ultima caratteristica essi sono genericamente etichettati come **rischi emergenti**.

Questi fenomeni avranno un impatto estremamente significativo soprattutto sulla filiera del petrolio, e più in generale sull'industria legata all'utilizzo dei combustibili fossili, che vedrà da un lato una riduzione di interesse economico per il settore (legata a scelte dirompenti quale quella dello stop ai veicoli a motore endotermico) ma al tempo stesso alla necessità di introdurre/subire soluzioni innovative indotte dal mutato scenario (come ad esempio i bio-carburanti e l'utilizzo dell'idrogeno). Il primo fattore indurrà una perdita di interesse nel settore con progressiva riduzione di investimenti per quel che riguarda la manutenzione evolutiva degli attuali siti produttivi, ma al tempo stesso la necessità di introdurre in tali siti elementi esogeni che creeranno gioco forza una maggiore complessità architettonica e la presenza di fattori di interferenza.

A ciò si sommano gli effetti dei cambiamenti climatici in termini di estremizzazione dei fenomeni climatici che rendono non adeguato il dimensionamento di alcune infrastrutture di servizio (come, ad esempio, le vasche di raccolta delle acque reflue sui piazzali) oltre che compromettere la staticità/operatività di alcuni elementi e manufatti (ad esempio a causa di venti di significativa intensità). Per contrastare gli effetti di questi fenomeni sarebbero necessari interventi di adeguamento degli attuali impianti che, però, appaiono, oltre che estremamente onerosi e non in linea con la riduzione di interesse per la filiera del fossile, di difficile identificazione/progettazione a causa della natura emergente di tali rischi (e quindi non riferibili a serie storiche). In questo contesto la transizione digitale rappresenta una leva utilizzabile per gestire questi cambiamenti ma che al tempo stesso introduce una serie di ulteriori rischi connessi sia con la perdita di centralità del fattore umano (in termini sia di numero di addetti che di ridotta capacità di trasferimento delle competenze) ma soprattutto con una crescente esposizione ai rischi di cyber security.

2. Il rischio Cyber

Sebbene l'automazione industriale sia entrata negli stabilimenti a partire dalla metà degli anni settanta, solo verso la fine degli anni '90 si sono iniziate a prendere in considerazione le implicazioni per la sicurezza legati al fattore digitale. O meglio, fino ai primi degli anni '90, il problema della sicurezza della componente di controllo

digitale era relegata agli aspetti connessi con i guasti del sistema informatico, i bug del software e gli errori (più o meno volontari) commessi dagli operatori.

A partire dalla fine degli anni '90 a queste problematiche che potremmo etichettare come di "cyber-safety", iniziano ad affiancarsi problematiche di cyber-security, ovvero di azioni dolose.

Occorre infatti considerare che fino alla metà degli anni '90 la stragrande maggioranza dei sistemi informatici utilizzati in ambito industriale, generalmente indicati come **ICS (Industrial Control System)**, era basata su hardware, software e protocolli proprietari ed operavano sostanzialmente in maniera isolata rispetto alla rete IT aziendale.

Le spinte connesse alla necessità di migliorare la flessibilità e l'efficienza della produzione, ridurre i costi unite alla necessità di aggiornare molti dei sistemi legacy per renderli immuni al *millenium bug* hanno spinto per un rapido cambio di contesto. Questo ha comportato una adozione massiccia all'interno dei siti industriali di prodotti IT off-the-shelf e, anche per soddisfare le esigenze produttive, ad una apertura e integrazione di questi sistemi con le infrastrutture IT aziendali.

Conseguenza non pianificata di ciò è stato che le reti industriali sono divenute soggette ai medesimi rischi propri dei sistemi IT. Purtroppo, i sistemi industriali hanno delle peculiarità in termini di tempi di latenza, capacità di calcolo, vincoli di banda, lifetime che rendono solo in parte replicabili i meccanismi di difesa propri dei sistemi IT [1]. Per sottolineare tale peculiarità nella comunità scientifica si è iniziato ad utilizzare il termine **OT (Operational Technologies)** per indicare i sistemi di controllo impiegati nell'ambito industriale in modo da contrapporlo ai sistemi IT.

3. Il progetto DRIVERS

DRIVERS (Approccio combinato data-driven ed experience-driven all'analisi del rischio sistemico) è un progetto co-finanziato da INAIL che ha quale obiettivo quello di fornire una metodologia ed uno strumento per mappare e riconoscere i rischi emergenti relativi ai cambiamenti climatici, alla transizione energetica e alla trasformazione digitale [9].

A tal fine si è adottato un modello tipo fishbone, per identificare per ciascuno dei tre ambiti i principali fattori acceleranti e frenanti, ovvero quei fattori che agiscono sull'hazard facendolo crescere o diminuire.

Tali fattori sono stati identificati e organizzati, con riferimento alle tre tipologie di rischi emergenti e relativamente alle industrie Seveso, con lo scopo di ottenere una raccolta abbastanza completa degli elementi che hanno importanza ai fini della comprensione e gestione dei problemi delle transizioni concorrenti, organizzati secondo uno schema gerarchico (fattori generali e subfattori specifici).

Con riferimento ai rischi cyber, come illustrato nella figura 1, sono stati individuati a livello sistemico 16 fattori "acceleranti", ovvero che amplificano il rischi cyber (obsolescenza; gestione dei dati operativi; gestione dei dati personali; gestione dei sistemi OT compromessi; integrazione; rete wireless; connessioni digitali; patching;

interferenze; ostacoli normativi; terze parti; accesso remoto; invecchiamento; riduzione del personale; turn over; limitata consapevolezza) e 20 fattori “frenanti”, cioè che rallentano l’insorgenza di tale rischio (risk assessment; modalità di lavoro; certificazioni di analisi dei rischi; certificazioni di cyber security; automazione dei processi; patching; sicurezza by-design dei dispositivi; audit periodico; backups del cloud; segregazione; riconoscimento dell’utenza; sistemi di protezione; training certificato; simulazioni e test; campagne informative; attività di lesson learned; regolazione specifica degli aspetti socio culturali di contesto; supervisione di competenza; figure di lavoro professionali; ecosistema di supporto).

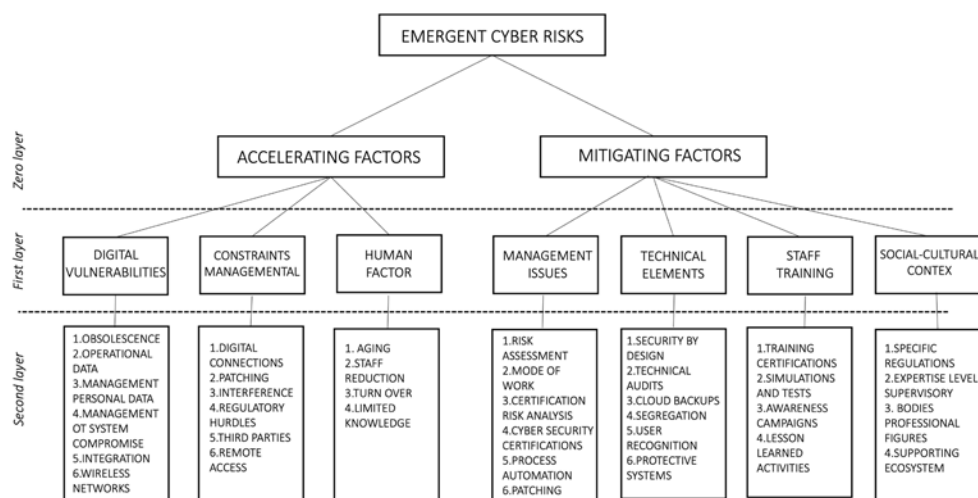


Figura 1. Elencazione fattori e sotto-fattori frenanti ed acceleranti per la trasformazione digitale

Successivamente gli schemi fishbone sono stati ulteriormente arricchiti attraverso l’interazione con i componenti dell’Advisory Board del progetto. Nello specifico a ciascun fattore è stato attribuito un peso attraverso la definizione di una scala di importanza del fattore che quantifica in maniera qualitativa l’incremento dell’hazard rispetto alla situazione tradizionale. A tal fine si è utilizzato l’approccio AHP sparso che si basa sul confronto a coppia dei singoli valori [2].

Tale analisi illustrata in dettaglio in [3] ha consentito di evidenziare come gli elementi maggiormente impattanti in termini di “accelerazione” del rischio cyber siano quelli legati al “fattore umano” a causa dell’invecchiamento della forza lavoro, delle limitate conoscenze degli operatori in campo circa le problematiche cyber e dell’elevato turn over. In Tabella 1 sono riportati i valori normalizzati indentificati per ciascun fattore accelerante. Nello specifico, i fattori acceleranti sono divisi per le macro aree e sono:

- legati alla sfera digitale sono: l’obsolescenza (con peso 0.0099); la gestione dei dati operativi e dei dati personali (entrambi con peso 0.0362); la compromissione di

- sistemi OT (0.0693), l'integrazione tra sistemi (0.0362) e la gestione reti wireless (peso 0.0693);
- legati alla gestione dei fornitori: la connessione digitale dei sistemi (0.0238); il patching (0.0149); l'interferenza (0.0238); gli ostacoli normativi (0.0048); la gestione delle terze parti (0.0021) e gli accessi da remoto (0.0009);
 - legati al definito "fattore umano": l'invecchiamento del personale (0.2101); la riduzione del personale (0.0420); il turn over (0.2101) e le limitate conoscenze (0.2101).

L'importanza del fattore umano non deve apparire anomalo essendo conclamato che la stragrande maggioranza degli incidenti cyber sono da ricondurre ad un non corretto comportamento di un operatore [4]. Giusto come esempio si riporta che sia il blocco dell'erogazione elettrica in Ucraina nel 2015 e 2016 che la paralisi dell'oleodotto Colonial Pipeline negli stati Uniti nel 2021 sono stati "innescati" da un comportamento non idoneo da parte di un operatore che è stato oggetto di phishing [1].

| Accelerating macro-criteria | Accelerating micro-criteria | Weight |
|-----------------------------|-----------------------------|--------|
| Digital Vulnerabilities | Obsolescence | 0.0099 |
| Digital Vulnerabilities | Operational data management | 0.0362 |
| Digital Vulnerabilities | Personal data management | 0.0362 |
| Digital Vulnerabilities | OT system compromise | 0.0693 |
| Digital Vulnerabilities | Integration | 0.0362 |
| Digital Vulnerabilities | Wireless networks | 0.0693 |
| Management constraints | Digital connections | 0.0238 |
| Management constraints | Patching | 0.0149 |
| Management constraints | Interference | 0.0238 |
| Management constraints | Legal barriers | 0.0048 |
| Management constraints | Third parties | 0.0021 |
| Management constraints | Remote access | 0.0009 |
| Human Factor | Aging | 0.2101 |
| Human Factor | Staff reduction | 0.0420 |
| Human Factor | Turn over | 0.2101 |
| Human Factor | Limited knowledge | 0.2101 |

Tabella 1. Pesi attribuiti ai fattori (e sotto-fattori) acceleranti relativi alla trasformazione digitale [3].

Oltre al fattore umano, l'analisi ha evidenziato l'importanza delle problematiche connesse con l'utilizzo della rete wireless e la compromissione dei componenti OT. Quest'ultimo aspetto appare quello più rilevante dal punto di vista dell'analisi del rischio essendo fortemente peculiare ed impattando in modo specifico su come son realizzati, monitorati e gestiti i singoli impianti.

Conseguentemente il progetto DRIVERS ha elaborato una metodologia per mappare i rischi cyber legati ai componenti OT.

4. Valutazione rischio Cyber dei componenti OT

Per la valutazione dei rischi cyber legati ai componenti OT si è optato per la strategia delineata nella Figura 2. Essa consta di tre macro-blocchi:

- **Inventory assesment:** il cui scopo è quello di indentificare i componenti hardware e software che costituiscono la rete OT;
- **Vulnerability Analysis:** il cui scopo è quello di verificare se esistono vulnerabilità note che affliggono una o più componenti della rete OT
- **Risk assesment:** il cui scopo è quello di valutare sulla base di informazioni reperibili sulla vulnerabilità e della rilevanza del singolo componente all'interno dell'infrastruttura qual è la rilevanza del potenziale impatto

Queste attività si concretizzano in un indice di rischio cyber che caratterizza il singolo componente informatico e che a sua volta contribuisce a definire un indice di rischio per ciascun device fisico, per ciascuna area in cui è suddiviso l'impianto e per l'intero impianto.

Si noti che un componente può essere affetto da zero, una o più vulnerabilità e che la medesima vulnerabilità può affliggere più componenti. In ottica conservativa il valore di rischio associato a ciascun componente è assunto pari al rischio maggiore.

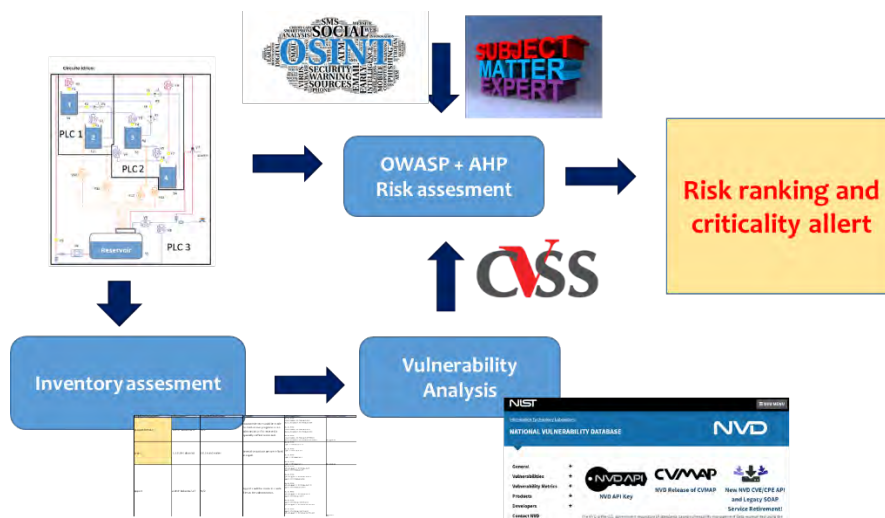


Figura 2. Schema metodologia per determinazione rischio cyber

5. La procedura per effettuare l'Inventory assesment

Sebbene a differenza di una rete IT, la rete OT si caratterizza per una minore dinamicità in termini di evoluzione dei protocolli e delle piattaforme, appare necessario avere un sistema in grado di fornire in modo dinamico un inventory degli apparati presenti nella rete al fine di poter valutare la presenza di eventuali vulnerabilità.

A tal fine si è sviluppato un tool per l'inventory automatico dei componenti hardware presenti in una rete OT. Il tool, realizzato in Python, è in grado di eseguire la scansione al fine di censire i dispositivi connessi alla rete. Il tool identifica,


```

1  "192.168.101.10": {
2    "osmatch": [],
3    "ports": [
4      {
5        "protocol": "tcp",
6        "portid": "502",
7        "state": "open",
8        "reason": "syn-ack",
9        "reason_ttl": "64",
10       "service": {
11         "name": "mbap",
12       },
13     },
14   ],
15   "hostname": [],
16   "macaddress": {
17     "addr": "00:80:F4:53:EB:77",
18     "addrtype": "mac",
19     "vendor": "Telemecanique Electric"
20   }
21 }

```

Figura 3. Schema metodologia per determinazione rischio cyber

in particolare, tutti i dispositivi di livello 3 (network level) che sono connessi alla stessa rete sulla quale esegue lo scan.

Il tool è basato sulle funzionalità del comando "nmap", il comando rappresenta uno strumento di scansione di rete frequentemente utilizzato per effettuare un check degli elementi connessi ad una rete. Questo consente di eseguire una scansione approfondita di una rete, identificando i dispositivi connessi e le porte aperte su tali dispositivi al fine di valutare i servizi attivi sui dispositivi connessi. L'utilizzo del comando "nmap" può fornire informazioni preziose sulla configurazione di rete al fine di rilevare vulnerabilità e valutare la sicurezza complessiva di un sistema.

L'output prodotto dallo script consiste in un file json che riporta in modo strutturato le informazioni disponibili per ciascun elemento di rete individuato.

Nell'esempio di Figura 3 il dispositivo individuato è un PLC Schneider Electric sul quale risulta attivo un server Modbus/TCP attivo sulla porta 502. Nello specifico il significato dei singoli campi è il seguente

"service": Fornisce informazioni sul servizio erogato sulla porta aperta.

"name": Indica il nome del servizio, che nel caso specifico Modbus Application Protocol (mbap).

"hostname": Questo campo rappresenta eventuali hostname locali associati all'indirizzo IP del dispositivo.

L'oggetto "macaddress" contiene i seguenti campi:

"addr": Rappresenta l'indirizzo MAC, che nel caso specifico è "00:80:F4:53:EB:77".

"addrtype": Indica il tipo di indirizzo, che nel caso specifico è "mac".

"vendor": Indica il produttore del dispositivo associato all'indirizzo MAC, che nel caso specifico è "Telemecanique Electric" sulla base dei primi 3 byte.

lo script fornisce informazioni riguardanti sia gli aspetti hardware che software del dispositivo identificato mostrando dettagli quali il costruttore dell'hardware relativo alla scheda di rete, prova a stimare il sistema operativo installato sul dispositivo e determina i servizi attivi su ogni porta aperta del dispositivo.

6. La procedura per effettuare la Vulnerability Analysis

Una volta effettuato l'inventario il sistema utilizza le API messe a disposizione dal National Institute for Standards and Technologies (NIST) degli Stati Uniti per individuare vulnerabilità note che posso affliggere uno o più componenti. Nello specifico il NIST gestisce un database, denominato NVD (National Vulnerability Database) [5] che contiene informazioni su tutte le vulnerabilità note di sistemi informativi. Il sistema è aggiornato con frequenza anche più che giornaliera, sia aggiungendo nuove vulnerabilità non appena vengono rese note, sia aggiornando le informazioni su vulnerabilità già censite in relazione ad una migliore comprensione dei rischi associati, ovvero della presenza di remediation. Attualmente il DB raccoglie informazioni su quasi 300.000 vulnerabilità di cui circa 30.000 scoperte nei primi 10 mesi del 2023.

All'interno di questo DB, ogni vulnerabilità è identificata con un codice composto dall'anno in cui è scoperta e da un numero progressivo. Ad esempio, la vulnerabilità CVE-2023-30692 è l'ultima vulnerabilità identificata nel 2023 alla data del 6 ottobre 2023.

All'interno di questo DB per ciascuna vulnerabilità è fornita una breve descrizione e l'elenco dei software, con relativa configurazione e versione, che sono affetti dalla vulnerabilità stessa. Inoltre, sono presenti informazioni sul grado di maturità della vulnerabilità, sull'eventuale esistenza di strumenti di remediation (ad esempio patch). È pertanto possibile verificare sulla scorta di quanto prodotto dall'inventario se un componente del sistema OT è affetto da tale vulnerabilità

Qualora ciò accada è possibile estrarre dal NVD anche una valutazione della relativa criticità della vulnerabilità.

A tale fine il NIST utilizza la metodologia CVSS (Common Vulnerability Scoring System) [6]. Tale metodologia assegna ad ogni vulnerabilità un punteggio compreso fra 0 e 10, dove il valore 10 indicata la massima criticità. Esso prevede che ad ogni vulnerabilità sia assegnato un valore di criticità intrinseco (definito base) che può essere ulteriormente raffinato mediante la dimensione temporale e quella di contesto.

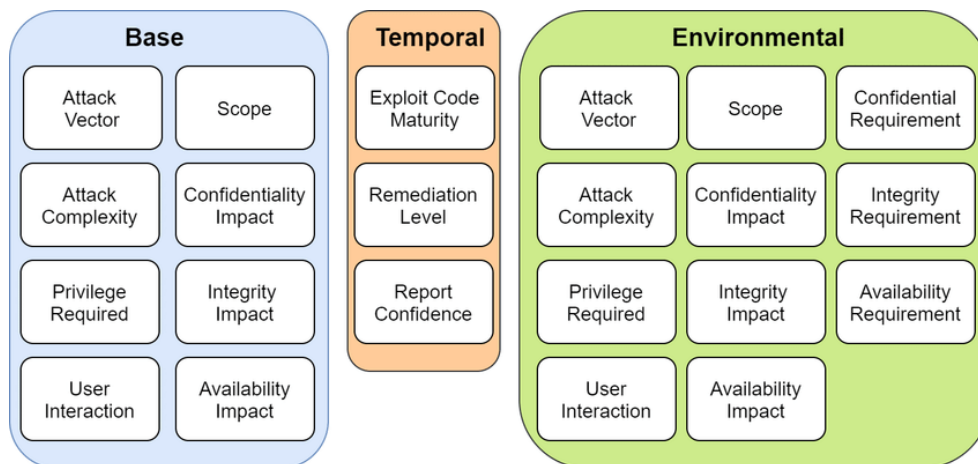


Figura 4. Elementi utilizzati in CVSS per la determinazione del livello di criticità di una vulnerabilità

Nello specifico l'indice base fornisce una valutazione sulla criticità intrinseca della vulnerabilità andando a considerare una serie di parametri che caratterizzano le risorse che l'attaccante deve avere a disposizione per sfruttare la vulnerabilità e quelli che sono gli impatti in termini di compromissione degli attributi di confidenzialità, integrità e disponibilità che si potrebbero generare dall'eventuale sfruttamento della vulnerabilità. Nella figura 4 sono illustrati i diversi parametri con riferimento alla versione 3.1 dello standard.

Il sito del NVD riporta per ciascuna vulnerabilità la valorizzazione di tutti i parametri "Base" definita sulla base delle conoscenze della vulnerabilità stessa. Inoltre, il sito del NVD riporta anche la valutazione del CVSS base di ciascuna vulnerabilità. Si evidenzia che sebbene i valori numerici attribuiti ai singoli parametri siano anch'essi nel range 0-10 con specifiche indicazioni su come graduare la scala, il modello utilizzato per la determinazione dello score finale è fortemente non lineare.

Pertanto, con l'utilizzo delle API è possibile acquisire il valore del Base score per ciascuna vulnerabilità.

Si noti che le schede relative alle diverse vulnerabilità sul sito del NVD sono aggiornate costantemente per allineare lo score (e gli altri parametri) alle nuove informazioni acquisite dai vendor e dai ricercatori.

Per gestire al meglio questo dinamismo il sistema DRIVERS tiene traccia di tutte le vulnerabilità acquisite al fine di verificare se qualcuna di esse presenti degli aggiornamenti.

7. La procedura per effettuare la Risk Assessment

Lo stesso NVD evidenzia che la determinazione della criticità di una vulnerabilità utilizzando esclusivamente il parametro base score rappresenta una prima approssimazione dell'effettivo rischio ad esso connesso.

Per ovviare in parte a tale problematica il CVSS suggerisce di utilizzare la metrica temporale e quella di contesto. Purtroppo, il NVD non valorizza tali valori che sono lasciati alla determinazione dell'utente finale.

Per fare ciò il progetto DRIVERS adotta una strategia basata su tecniche OSINT e sulla valutazione di un digital twin dell'impianto.

Nello specifico per la determinazione del parametro temporale il sistema raccoglie le informazioni presenti sul sito NVD sul livello di maturità della vulnerabilità (ufficialmente confermata, etc.). Tali informazioni potranno, inoltre, essere raccolte ed integrate con informazione acquisite su altri siti, quali ad esempio il CSIRT nazionale [7] o in forum sul dark web. Inoltre, l'utente può inserire un parametro correttivo legato alla eventuale implementazione di contromisure in grado di rimediare in parte o del tutto alla vulnerabilità stessa.

Per la valutazione della dimensione "environment" si è scelto di non utilizzare la metodologia prevista dal CVSS ma definire una diversa valutazione impiegando un modello di dipendenza funzionale schematicamente illustrato nella figura 5.

Nello specifico in fase di localizzazione sulla piattaforma DRIVERS di un impianto è associato ai diversi dispositivi OT il relativo device "fisico". A loro volta i device fisici sono raggruppati in "aree". In fase di inizializzazione è richiesto all'utente di specificare quale è il grado di "inoperabilità" [8] che da uno specifico device si trasmette all'area associata.

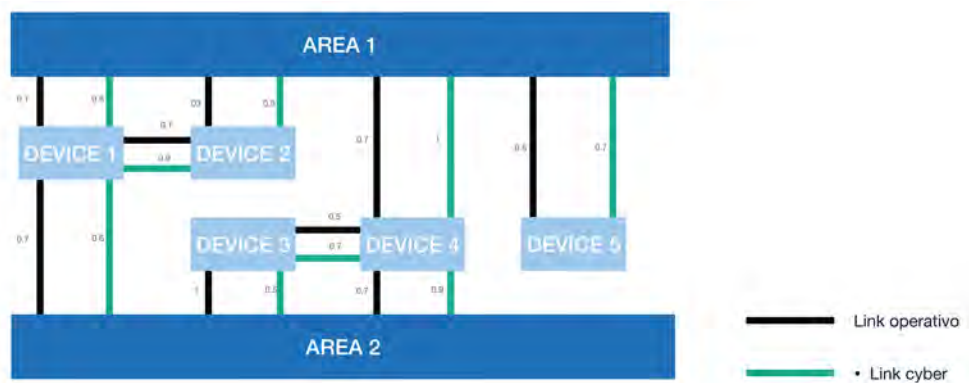


Figura 5. Rappresentazione delle dipendenze funzionali e cyber

Sulla base di tale valore si determina, considerando gli effetti di dipendenza diretta ed indiretta quello che potrebbe essere l'entità dell'impatto associato alla vulnerabilità cyber.

8. Case Study

Nell'ambito del progetto DRIVERS è stata realizzata una piattaforma in grado di acquisire dinamicamente informazioni sui rischi di carattere naturale, operativo e cyber al fine di evidenziare elementi di criticità. La piattaforma, ancora in fase di sviluppo è presentata nella Figura 6.

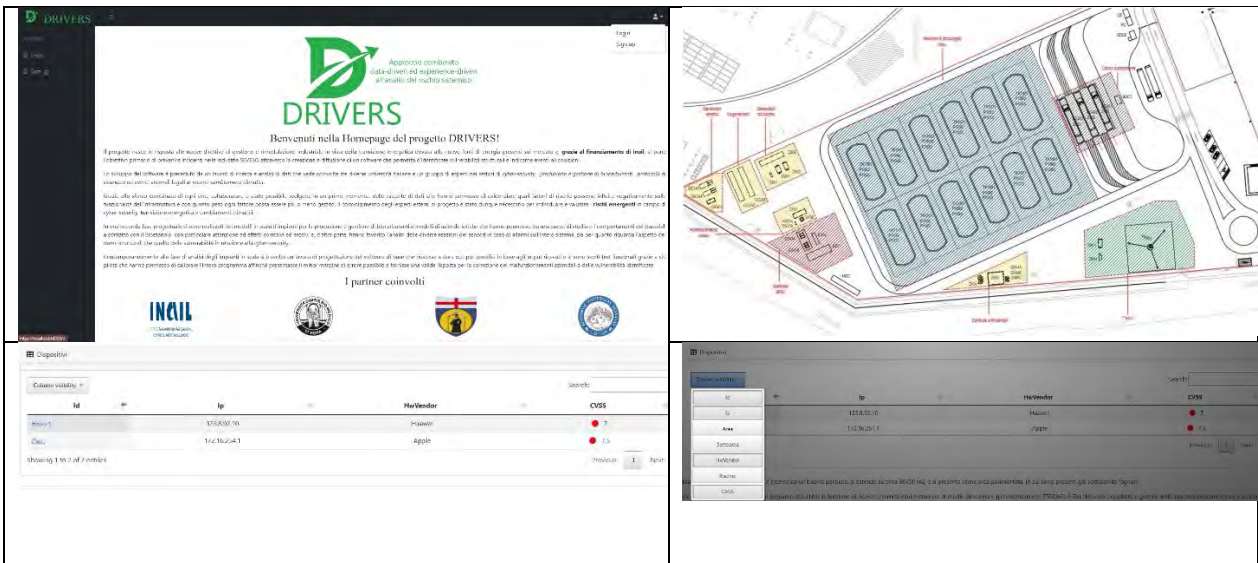


Figura 6. Alcune schermate della piattaforma DRIVERS

L’impianto è suddiviso in tre aree a cui corrispondono tre distinte porzioni del sistema OT come illustrato nella Figura 7. Il sistema con il modulo inventory effettua una disamina su base giornaliera della rete OT per acquisire informazioni su tutti i componenti presenti.

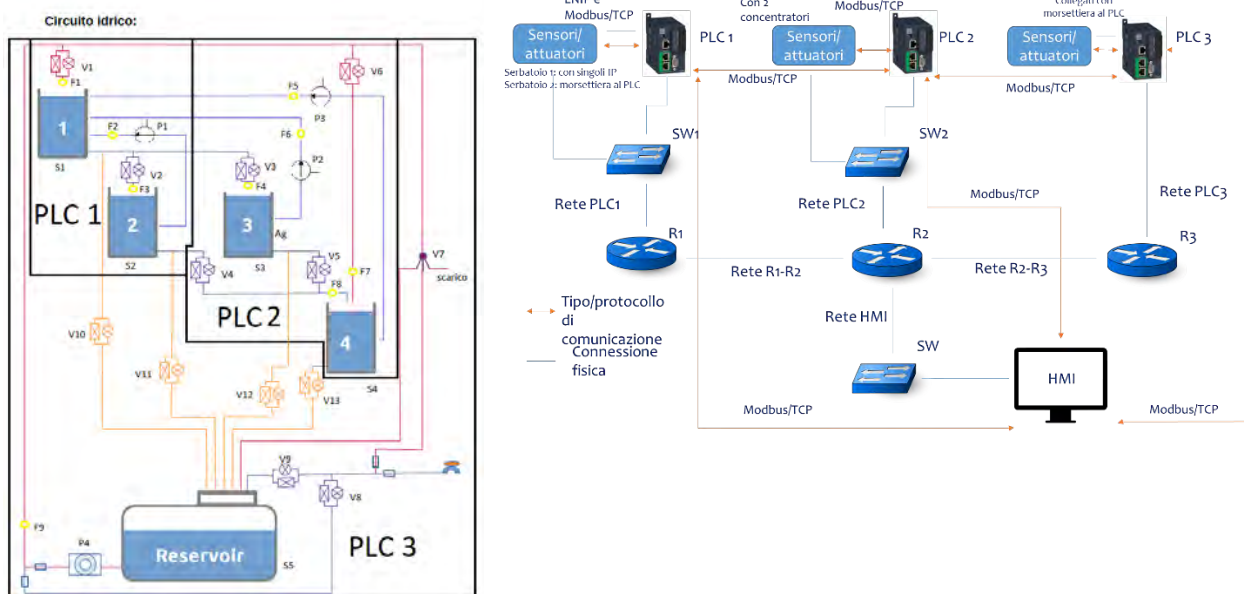


Figura 7. Test-bed impiegato per le attività di inventory.

Tali informazioni sono passate al modulo di Vulnerability Analysis che va a ricercare tramite le API se sul sito del NVD siano presenti vulnerabilità note che affliggono uno dei componenti individuati nella prima fase. L’analisi distingue fra quelle che sono vulnerabilità già analizzate e vulnerabilità nuove. Inoltre, la piattaforma mantiene traccia anche di vulnerabilità “risolte”.

9. Conclusioni

Il progetto DRIVERS si è posto quale obiettivo quello di realizzare una piattaforma in grado di fornire all'operatore un'informazione unitaria rispetto a rischi di origine naturale, operativa e cyber. Per ciascuna di queste categorie esso acquisisce elementi sul possibile hazard a partire dal monitoraggio delle vulnerabilità cyber, dalle informazioni sulle attività operative e da previsioni di forecast e nowcast. Tali elementi sono integrati per determinare il livello di rischio associato a ciascun dispositivo e in modo aggregato a ciascuna delle aree in cui è suddiviso l'impianto. A questi elementi vengono fusi con le informazioni relative ai fattori acceleranti / frenanti proprie dell'impianto e dei suoi componenti. In questo modo si fornisce all'operatore un'indicazione di quelle che sono i rischi maggiormente significativi. L'operatore può navigare fra i diversi livelli della piattaforma per meglio comprendere come i singoli elementi si combinano fra di loro e per meglio analizzare la rilevanza sistemica dei singoli elementi.

10. Bibliografia

- [1] Assenza, G., Faramondi, L., Oliva, G., & Setola, R. (2020). Cyber threats for operational technologies. *International Journal of System of Systems Engineering*, 10(2), 128-142.
- [2] Oliva, G., Setola, R., & Scala, A. (2017). Sparse and distributed analytic hierarchy process. *Automatica*, 85, 211-220.
- [3] Nobili, M., Fioravanti, C., Guarino, S., Ansaldi, S. M., Milazzo, M. F., Bragatto, P., & Setola, R. (2023, June). DRIVERS: A platform for dynamic risk assessment of emergent cyber threats for industrial control systems. In *2023 31st Mediterranean Conference on Control and Automation (MED)* (pp. 395-400). IEEE.
- [4] Corradini, I., Nardelli, E., & Ahram, T. (2020). *Advances in Human Factors in Cybersecurity*. Springer International Publishing.
- [5] <https://nvd.nist.gov/>
- [6] Scarfone, K., & Mell, P. (2009, October). An analysis of CVSS version 2 vulnerability scoring. In *2009 3rd International Symposium on Empirical Software Engineering and Measurement* (pp. 516-525). IEEE.
- [7] <https://www.csirt.gov.it/>
- [8] Setola, R., De Porcellinis, S., & Sforza, M. (2009). Critical infrastructure dependency assessment using the input-output inoperability model. *International Journal of Critical Infrastructure Protection*, 2(4), 170-178.
- [9] <https://www.emergentrisk.it/index.php/it/>

Implementazione di un piano di gestione dei giunti flangiati imbullonati con interposta guarnizione negli impianti chimici e petrolchimici. Un approccio di “flange management” per la riduzione dei rischi.

F. Cucè¹, M. Cantone¹, R. Nicosia¹, R. Acerboni², F. Boella², A. De Palma², F. Rocchi²

¹ VED Vetroresina Engineering Development S.r.l.

² Inail - Uot di Venezia-Mestre

Abstract

La manutenzione dei giunti flangiati imbullonati, benché utilizzati nelle medesime condizioni di processo delle giunzioni saldate e presentando quindi un rischio simile, è soggetta, rispetto a queste ultime, ad una gestione semplificata, riguardante principalmente il serraggio delle aste, la valutazione della coppia da applicare e la sequenza di applicazione, trascurando tuttavia altri aspetti che influenzano profondamente il risultato finale.

Durante una fermata impianti, i giunti da verificare possono essere migliaia, il tempo disponibile limitato e diventa quindi importante implementare un programma di gestione dei giunti flangiati imbullonati, da integrare nelle operazioni di ogni impianto industriale più o meno complesso.

L'adozione di un sistema di gestione dei giunti installati in un impianto, riducendo notevolmente il numero di perdite, migliora la sicurezza e l'affidabilità dei circuiti in pressione.

Keywords: giunti flangiati, gestione, manutenzione.

1. Introduzione

Se si osservano con attenzione i giunti flangiati imbullonati in un impianto, si riscontrano ricorrenti errori di assemblaggio che potrebbero avere effetti dannosi durante il normale esercizio dell'impianto: bulloneria di diametro non corretto, troppo corta (Figura 1) o troppo lunga (Figura 2), di materiale non in accordo alle specifiche, o di materiali diversi, dadi incassati nelle flange, flange disallineate, tipologie di guarnizioni diverse su giunti contigui.

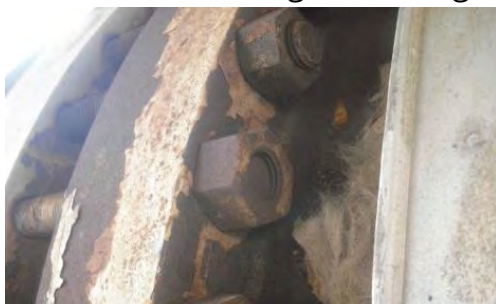


Figura 1



Figura 2

Se, come di norma accade, ciò che si vede è indicativo della qualità di ciò che invece non è immediatamente visibile, allora ci si rende conto che è necessario ricorrere ad un nuovo approccio manutentivo, in cui ogni operazione relativa alla manutenzione venga eseguita secondo istruzioni ben precise, frutto della conoscenza approfondita dell'argomento e nello specifico del giunto flangiato nel suo complesso, composto da flange, guarnizioni e bulloneria

Se si considerano i rischi per l'ambiente e le persone, e la mancata produzione dovuta alle perdite che si verificano in impianto, ci si rende conto che è necessario implementare un sistema di manutenzione del giunto che miri al raggiungimento dell'obiettivo "zero leak" (perdite zero).

2. Elementi principali del giunto flangiato

Il tipo di giunto più comune è costituito da due flange tra le quali è installata una guarnizione compressa dalla bulloneria installata (Figura 3).

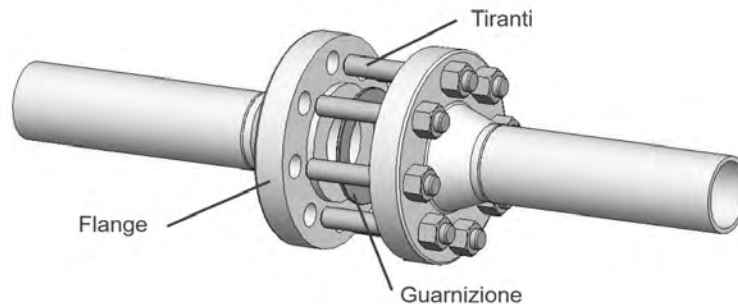


Figura 3

La bulloneria, sottoposta a un carico di trazione, fornisce una sollecitazione di compressione del giunto e di tenuta della guarnizione sufficiente a sopportare la pressione e le forze massime durante l'esercizio, come illustrato nella Figura 4.

Per garantire l'integrità del giunto, è necessario mantenere un livello minimo di sollecitazione della sede della guarnizione durante l'intero servizio del giunto; pertanto, il carico/compressione di progetto del bullone al momento dell'installazione deve tenere conto dello scorrimento, del rilassamento, dell'incertezza sui carichi di servizio e delle tolleranze dei componenti e degli strumenti utilizzati.

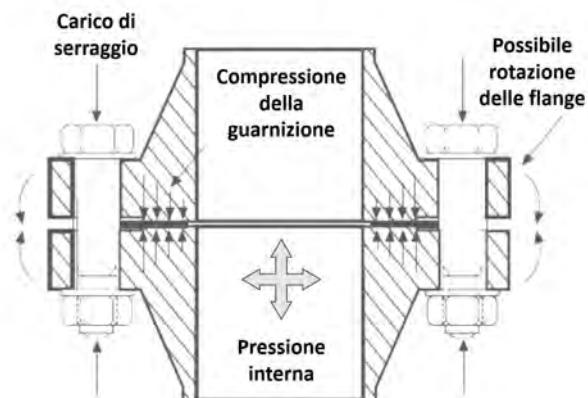


Figura 4

3. Principi fondamentali del sistema di gestione

I seguenti otto principi fondamentali devono essere applicati per garantire che il sistema di gestione dei giunti flangiati sia implementato e rimanga efficace.

- *Titolarità*

Deve essere identificato un titolare del sistema di gestione, responsabile non solo della sua manutenzione continua, ma anche di comunicarne gli scopi e gli obiettivi all'interno dell'organizzazione.

- *Tecnologia e buone prassi*

Devono essere applicate le migliori tecniche disponibili per quanto riguarda la selezione e il controllo dell'assemblaggio, del serraggio e della garanzia dei giunti imbullonati. La comprensione della teoria e della pratica dei giunti imbullonati e lo sviluppo di procedure appropriate devono essere incoraggiati in tutta l'organizzazione.

- *Livello di criticità*

La variabilità delle condizioni di progetto e di esercizio dei circuiti in pressione è così ampia che occorre fare una valutazione del livello di criticità che determinerà i livelli di ispezione, controllo dell'assemblaggio, tecnica di serraggio, test e garanzia dei giunti flangiati.

- *Formazione e competenza*

Tutti coloro che prendono parte al processo di implementazione e mantenimento del sistema di gestione devono essere consapevoli dei suoi obiettivi, delle aspettative e degli effetti sulla pianificazione del progetto. Il personale che opera sui giunti flangiati deve essere adeguatamente formato e competente.

- *Database, gestione dei dati ed etichettatura*

L'obiettivo di mantenere il più a lungo possibile l'integrità del giunto è perseguibile se esistono dati storici sulle attività svolte in passato, idealmente a partire dalla costruzione originale del giunto, collegata alle specifiche di progetto del giunto stesso. La disponibilità di dati rintracciabili incoraggia l'adozione delle migliori pratiche al momento dell'attività e fornisce utili indicazioni per il successivo intervento sul giunto.

- *Ispezione in campo*

Un sistema di gestione dovrebbe includere i mezzi per raccogliere i dati rilevanti sui giunti integri e su quelli che hanno avuto incidenti o problemi di tenuta. Questi dati devono essere raccolti da tutti coloro che si occupano dei giunti flangiati imbullonati e periodicamente rivisti e analizzati per stabilire tendenze, problemi e opportunità di miglioramento.

- *Gestione delle perdite*

L'obiettivo di un giunto flangiato imbullonato correttamente progettato e installato è quello di fornire una tenuta a lungo termine e impedire le perdite di fluidi attraverso il giunto. Tuttavia, le perdite possono verificarsi: l'analisi del guasto e la tipologia di riparazione messa in atto sono essenziali per evitare che si ripetano, potendo inoltre fornire dati utili per la prevenzione in altre situazioni.

- *Analisi e apprendimento*

L'analisi dei dati relativi alle perdite e alle ispezioni e le revisioni formali del sistema di gestione devono avvenire a intervalli concordati dal titolare e dagli utenti. I risultati ottenuti dalla messa in servizio, dall'analisi degli incidenti e dalle ispezioni in servizio devono essere utilizzati per generare idee per il miglioramento continuo.

- *Miglioramento continuo*

Al momento dell'avvio del sistema, si dovrebbero definire standard di prestazione significativi e facilmente monitorabili, per quantificare il contributo del sistema di gestione e valutare la soddisfazione degli utenti. Il feedback sulle buone pratiche in materia di integrità e sulle cause e soluzioni degli incidenti deve essere fornito sia internamente che al settore industriale, per contribuire al miglioramento continuo dell'intero sistema.

4. Le fasi del “flange management”

La sequenza delle operazioni da attuare per implementare e mantenere un efficiente sistema di gestione dei giunti flangiati è la seguente:

- censimento dei giunti;
- elaborazione del database;
- etichettatura dei giunti e verifica in campo delle reali condizioni dei giunti;
- riesame dei giunti e aggiornamento del database;
- pianificazione degli interventi di manutenzione;
- emissione delle schede di manutenzione del giunto;
- manutenzione dei giunti;
- aggiornamento database ed emissione report.

Di seguito sono descritte nel dettaglio le singole fasi.

4.1 Censimento dei giunti

Il primo passo per l'implementazione del sistema di gestione dei giunti flangiati è la raccolta delle informazioni documentali, che deve essere la più completa ed esaustiva possibile.

Definiti i circuiti in pressione su cui applicare il sistema, si procederà ad estrarre l'elenco dei giunti dai seguenti documenti:

- P&ID;
- disegni isometrici;
- disegni delle apparecchiature a pressione;
- specifiche di linea.

È importante definire sin dall'inizio un sistema di codifica univoco dei giunti flangiati imbullonati che consenta una facile ed agevole identificazione in impianto. Un esempio di codifica è mostrato in Figura 5.

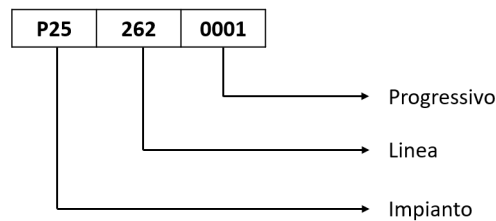


Figura 5

4.2 Elaborazione del database

Il passo successivo è l'inserimento nel database di tutte le informazioni relative ai giunti flangiati precedentemente censiti.

Il database deve contenere per ciascun giunto almeno le seguenti informazioni minime.

Giunto flangiato imbullonato:

- identificazione del giunto;
- posizione in impianto (ubicazione) del giunto;
- disegni e specifiche di riferimento.

Flange:

- normativa di riferimento (es. ASME B16.5, ASME B16.47, UNI EN 1092-1, B.S. 3293, JIS B 2220) o disegno di riferimento per flange non standard;
- materiale;
- dimensione (size o DN);
- classe di pressione (rating o PN);
- tipologia dell'estremità (es. WN, LWN, SO, SW, LJ, B);
- tipologia della faccia di contatto (RF, FF, LMF, SMF, STG, LTG, RTJ);
- grado di finitura superficiale richiesto della sede di appoggio della guarnizione (es. $R_a=3,2\div6,3 \mu\text{m}$ o $\text{RMS}=125\div250 \mu\text{in}$).

Guarnizione:

- normativa di riferimento (es. ASME B16.20, ASME B16.21, UNI EN 1514-1÷8, UNI EN 12560-1÷7, JIS B 2404) o disegno di riferimento per guarnizioni non standard;
- tipologia (es. spirometallica, piana, metal jacketed);
- materiale
- bulloneria:
 - normative di riferimento (es. ASTM A193, ASMT A 194);
 - materiale delle aste filettate e dei dadi;
 - quantità, diametro e lunghezza;
 - eventuali trattamenti e/o rivestimenti;
 - eventuale presenza di washer;
 - metodo di serraggio richiesto (a coppia controllata o a carico controllato);
 - indicazione della coppia di serraggio e/o della tensione residua richiesta;
 - riferimento alla procedura di serraggio da utilizzare;
 - lubrificante.

È possibile, inoltre, registrare dati aggiuntivi per rendere il sistema più facile da usare ed efficace come strumento di pianificazione, come ad esempio:

- condizioni generali del giunto;
- eventuali eccezioni o anomalie relative al giunto.

4.3 Etichettatura dei giunti e verifica in campo delle reali condizioni dei giunti

Per pianificare al meglio le attività di manutenzione, è necessario che il giunto sia fisicamente etichettato in modo che la sua identificazione in impianto sia chiara e agevole.

È vantaggioso assegnare ai giunti flangiati sia etichette permanenti che temporanee.

4.3.1 Etichette permanenti

Lo scopo dell'etichetta permanente, laddove applicabile, è quello di identificare in modo univoco un giunto per tutto il suo ciclo di vita, consentendo di registrare tutte le attività e i dati relativi a quel giunto. Le targhette permanenti devono essere fissate in modo sicuro al giunto e non possono contenere altri dati oltre all'identificativo univoco del giunto (Figura 6). Nella scelta della targhetta permanente, occorre tenere conto del metodo di fissaggio, della temperatura della flangia, del materiale della targhetta e del dispositivo di sicurezza, della permanenza delle marcature della targhetta e della possibilità di evitare punti di corrosione dovuti a metalli simili o a ristagni d'acqua.



Figura 6

4.3.2 Etichette temporanee

Lo scopo dell'etichetta temporanea è quello di identificare il giunto durante le attività di manutenzione e di indicare lo stato del giunto durante le varie fasi del lavoro. La targhetta contiene normalmente il numero identificativo univoco del giunto; può inoltre contenere una piccola quantità di informazioni, come il metodo e la data di serraggio.

Un metodo comune è quello di utilizzare etichette a strappo in cui lo stato è indicato dal colore delle porzioni rimanenti sull'etichetta (Figura 7):



Figura 7

Generalmente l'etichetta intera viene installata all'inizio del periodo di fermata impianti. Ad ogni fase di lavoro il referente della società responsabile dell'intervento staccherà la sezione corrispondente dell'etichetta e la consegnerà al supervisore delle flange management, il quale potrà controllare lo stato avanzamento dei lavori, affrontare tempestivamente eventuali anomalie e aggiornare in tempo reale i dati del database.

Al termine degli interventi soltanto la sezione principale dell'etichetta rimarrà fissata sul giunto a testimonianza che tutte le fasi di lavoro sono state effettivamente eseguite e controllate.

In caso di anomalie che dovessero verificarsi in fase di avviamento o durante il normale esercizio dell'impianto, vi sarà sempre la possibilità di individuare come, quando e da chi è stata eseguita ogni fase, definendo più facilmente criticità e azioni migliorative.

4.4 Riesame dei giunti e aggiornamento del database

Durante le operazioni di cartellinatura di cui al punto precedente, è di fondamentale importanza verificare che le informazioni relative ai giunti flangiati contenute nel database corrispondano alle effettive condizioni di ritrovamento dei giunti in impianto. Preferibilmente mediante l'uso di un tablet si segnaleranno tutte le difformità e le anomalie riscontrate in fase di sopralluogo.

4.5 Pianificazione degli interventi di manutenzione

Completato il riesame delle informazioni, si procederà a pianificare gli interventi di manutenzione che, per ciascun giunto, possono essere raggruppati nelle seguenti fasi:

- disassiemaggio;
- ispezione dei componenti;
- assiemaggio;
- serraggio del giunto;
- verifica finale.

Ciascuna delle fasi succitate verrà eseguita da una ditta qualificata, il cui personale sarà stato precedentemente formato e istruito.

Verranno emesse delle istruzioni operative, condivise con tutti gli interessati al progetto, che disciplineranno le modalità di esecuzione delle attività.

Dovrà essere nominato un supervisore delle attività, il cui compito sarà quello di coordinare gli interventi di manutenzione durante il periodo di fermata, con l'obiettivo di controllare lo stato avanzamento dei lavori e assicurare il corretto svolgimento degli interventi in accordo alle istruzioni operative.

4.6 Emissione delle schede di manutenzione del giunto

Prima dell'inizio dei lavori, per ogni singolo giunto verrà emessa la scheda di manutenzione che, oltre a contenere i dati identificativi e caratteristici del giunto (impianto, linea, item, disegno, flange, guarnizione, tiranteria, etc.), fornirà tutte le informazioni necessarie ad eseguire gli interventi manutentivi, in accordo alle istruzioni operative, e conterrà delle check-list di riscontro per ciascuna fase del progetto (vedi esempio Figura 8).

| | |
|--|---|
| Joint Identification: | |
| Plant name: _____ | Equipment/Dwg. no.: _____ |
| Joint description/number: _____ | |
| Joint Description: | |
| Diameter: _____ | Pressure rating: _____ |
| Gasket type and materials: _____ | |
| Gasket size (O.D., I.D., and thickness): _____ | |
| Bolt/nut specification: _____ | Bolt size: _____ Bolt length: _____ |
| Washer description: _____ | |
| Assembly Description: | |
| Disassembly procedure required? Yes / No | Keep failed gasket? Yes / No |
| Assembly method to be used: _____ | |
| Target assembly bolt stress: _____ | |
| Torque or tension setting required: _____ | |
| Assembly re-torque required? Yes / No | Re-torque torque value: _____ |
| Lubricant to be used: _____ | |
| Other special instructions: _____ | |
| Tool Identification: | |
| List tool and pump (if applicable) unique calibration identifiers: _____ | |
| _____ | |
| Joint Assembly Sign-Off: | |
| (1) Disassembled flange inspected | Joint Assembly Parameter Records: |
| (2) Gasket inspected pre-install | |
| (3) Bolt pre-install (free-running) | |
| By: _____ Sign: _____ | |
| (4) Joint alignment | |
| By: _____ Sign: _____ | |
| (5) Bolts lubricated | |
| By: _____ Sign: _____ | |
| (6) Joint snug tightened | |
| By: _____ Sign: _____ | |
| (7) Joint 100% assembled | Nut/washer bearing surface condition: _____ |
| By: _____ Sign: _____ | Flange finish and flatness: _____ |
| (8) Joint leak tested | Max. radial defect: _____ Defect depth: _____ |
| By: _____ Sign: _____ | Max. run-out: _____ Max. warp: _____ |
| (9) Final QC sign-off | Joint alignment: _____ |
| Sign: _____ Date: _____ | Max. axial gap: _____ |
| | Max. alignment load: _____ |
| | Joint in-process alignment: _____ |
| | Max. gap difference @ snug: _____ |
| | Max. gap difference @ tight: _____ |
| | Final pump pressure used: _____ |
| | Joint leak test: _____ |
| | Test pressure _____ Leak: Yes / No |
| | Action taken if leaked: _____ |
| Notes/Problems: | |
| _____ | |
| _____ | |
| _____ | |
| Return completed record to _____ (Name) | |

Figura 8

4.7 Manutenzione dei giunti

Durante la fermata dell'impianto, si eseguiranno gli interventi manutentivi precedentemente pianificati. Ciascuna fase della manutenzione del giunto, eseguita dalla ditta incaricata dell'intervento, dovrà essere registrata nella scheda di manutenzione e dovrà essere notificata al supervisore, che si occuperà di aggiornare in tempo reale il database.

Le etichette temporanee a strappo forniranno un valido aiuto nell'individuazione in impianto dei giunti e nella comunicazione puntuale al supervisore dello stato di avanzamento dei lavori.

Le attività minime che dovranno essere eseguite sono di seguito elencate suddivise per fasi.

4.7.1 Disassiemaggio

Prima di smontare qualsiasi giunto, è essenziale che sia assicurato, dal personale responsabile dell'impianto, che tutta la pressione, inclusa quella data dal battente liquido, sia stata rimossa dal sistema e che le corrette procedure per garantire che tutti i giunti possano essere aperti in sicurezza siano state seguite.

Un numero sufficiente di dadi allentati deve essere lasciato in posizione fino a che tutta la tensione è stata rilasciata, per proteggere da cadute di componenti, tubazioni dotate di molle o altri movimenti imprevisti. A causa della possibile presenza di liquido residuo lungo la tubazione con qualsiasi pressione non scaricata, i primi tiranti da allentare devono essere in una posizione che diriga qualsiasi rilascio di pressione lontano dal manutentore. Di solito, per giunti con piano verticale, questa zona sarà alla sommità del giunto e poi ai piedi per drenare il liquido.

L'adozione di una procedura di smontaggio del giunto è consigliata per giunti aventi le seguenti caratteristiche:

- (a) flange più grandi di DN600 (NPS 24");
- (b) flange con spessore maggiore di 125 mm;
- (c) tiranti con diametro M45 (1¾ in.) e superiore.

4.7.2 Ispezione dei componenti

A valle dello smontaggio del giunto, dopo aver accuratamente pulito tutti i componenti, occorre almeno verificare che:

- le sedi di tenuta delle guarnizioni sulle flange non presentino danneggiamenti (la valutazione dei difetti viene normalmente eseguita secondo le indicazioni delle fig. D-3 e D-4 della ASME PCC-1, Figure 9 e 10) e abbiano la finitura superficiale richiesta in funzione della tipologia di guarnizione installata;

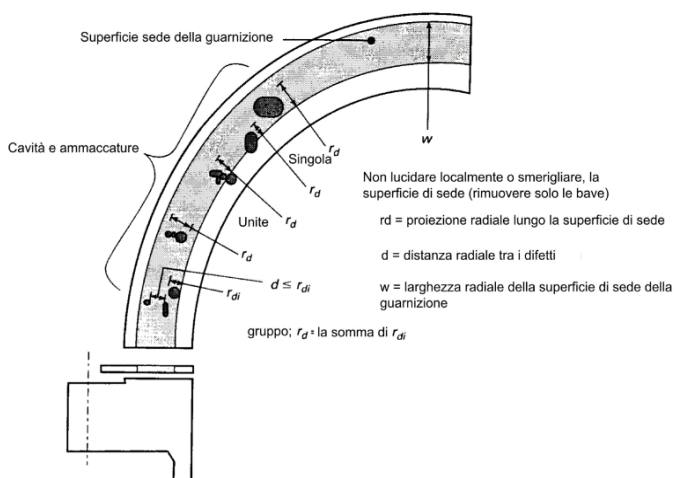


Figura 9

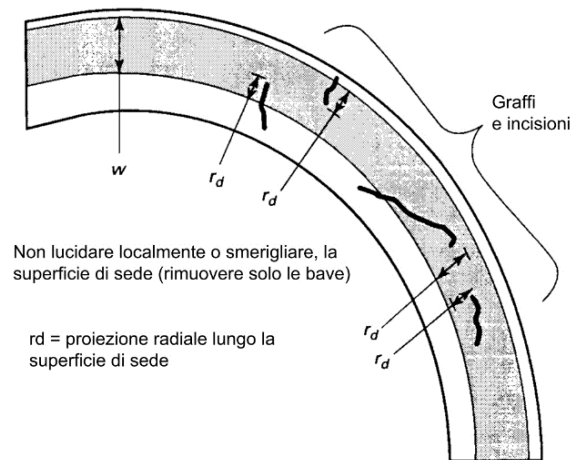


Figura 10

- le superfici della flangia che andranno a contatto con i dadi siano regolari ed esenti da difetti causati da precedenti serraggi;
- la quantità, le dimensioni (diametro e lunghezza) e i materiali della tiranteria siano in accordo alla specifica di linea o al disegno se si tratta di apparecchiature;
- le aste e i dadi siano puliti, sgrassati, asciutti, non presentino ammaccature, strappi e corrosioni profonde;
- i dadi ruotino liberamente sui tiranti (la filettatura sia regolare e senza asimmetrie dovute a precedenti carichi eccessivi);
- la guarnizione sia quella prevista a specifica, o a disegno se si tratta di apparecchiature. - le guarnizioni siano pulite e prive di danneggiamenti.

4.7.3 Assiemaggio

Spesso sottovalutata, è probabilmente la fase più importante e delicata della manutenzione del giunto.

L'addestramento e la formazione del personale addetto all'assemblaggio dei giunti dovrebbero essere svolti in accordo all'Appendice A della norma ASME PCC-1-2022. Anche la norma UNI EN 1591-4:2013 fornisce indicazioni sulla "qualificazione delle competenze del personale per il montaggio delle connessioni bullonate nei sistemi pressurizzati in servizio critico".

I componenti devono essere assemblati in accordo alle istruzioni operative e al metodo di serraggio da utilizzare.

Durante l'assiemaggio del giunto occorre almeno verificare che:

- il giunto flangiato sia correttamente allineato (Figura 11);

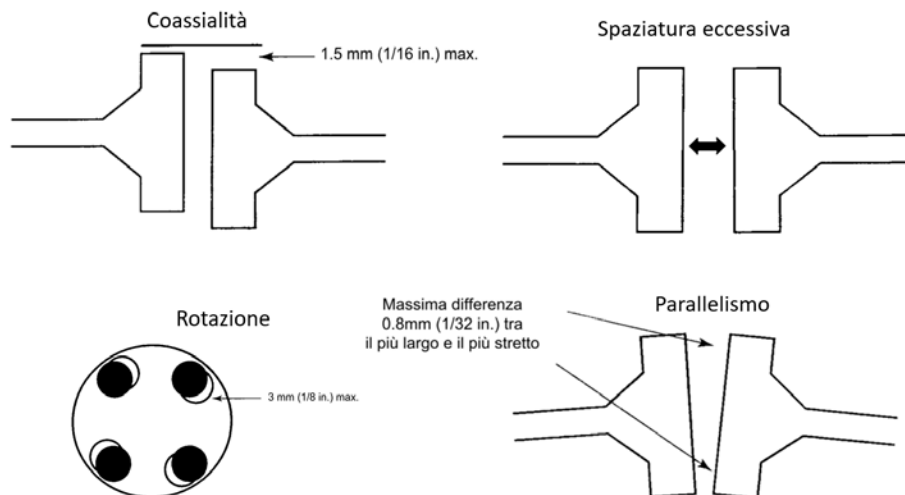


Figura 11

- la porzione di tirante su cui verrà montato il dado sia adeguatamente lubrificata;
- i dadi siano lubrificati sia sui filetti che sulle facce che andranno a contatto con la flangia;

- i tiranti siano posizionati correttamente nella flangia, avendo cura che la sporgenza della filettatura consenta l'utilizzo delle attrezzature di serraggio, soprattutto nel caso di serraggio con tensionatori idraulici;
- siano installate le washer, se previste;
- la guarnizione sia centrata e mantenuta in posizione senza impiegare grasso e altre paste che interessino l'elemento di tenuta e la sede di contatto della flangia; è ammesso l'uso di leganti spray in film sottile.

4.7.4 Serraggio

Si procederà al serraggio secondo le istruzioni riportate nella scheda di manutenzione del giunto, in cui saranno almeno indicati:

- la modalità di serraggio
 - a) a coppia controllata con chiavi torsionometriche manuali, pneumatiche, idrauliche o elettriche (a batteria);
 - b) a carico controllato con tensionatori idraulici;
- i valori del carico di serraggio, della tensione residua e, nel caso di serraggio con chiavi torsionometriche, della coppia di serraggio;
- la sequenza di applicazione;
- l'eventuale controllo dell'allungamento delle aste filettate.

Per garantire l'affidabilità delle operazioni, è importante che le attrezzature di serraggio soddisfino le specifiche richieste e siano sottoposte a manutenzione e taratura almeno ogni anno o più spesso se le circostanze lo richiedono.

4.7.5 Verifica finale

L'ultima fase del programma di manutenzione dei giunti è l'ispezione visiva in impianto. Occorre verificare che non vi siano anomalie, dimenticanze, inosservanze o imprevisti che possano inficiare, o addirittura vanificare, il risultato degli interventi eseguiti.

Si dovrà prestare particolare attenzione che la bulloneria sia stata installata correttamente e sia adeguatamente lubrificata, che l'allineamento del giunto sia all'interno delle tolleranze richieste, che la guarnizione, ove visibile, sia centrata. Inoltre, a campione, è utile verificare la congruità dei materiali di dadi e tiranti con le specifiche di linea.

4.8 Aggiornamento database ed emissione report

Al termine delle attività di manutenzione, verrà redatto un report contenente l'elenco dei giunti movimentati e le relative schede di manutenzione debitamente compilate.

Il report costituirà un importante documento per la verifica e l'analisi di eventuali anomalie (trafilamenti o perdite) che dovessero verificarsi durante le fasi di avviamento o il normale esercizio dell'impianto.

Sulla base delle informazioni disponibili, si potranno definire e pianificare azioni correttive e migliorative, sia tecniche che organizzative, al fine di un miglioramento continuo dell'affidabilità dei giunti.

5. Software per il “flange management”

Per migliorare e semplificare l'implementazione di un piano di gestione dei giunti flangiati imbullonati con interposta guarnizione negli impianti chimici e petrolchimici, sono disponibili sul mercato dei software specialistici, che grazie al sempre maggior ricorso a strumentazione digitale (es. sistema di etichettatura con codice QR, connessione bluetooth delle attrezzature di serraggio, dispositivi mobili ATEX per l'aggiornamento in tempo reale dei dati), consentono una gestione accurata, puntuale e oggettiva di tutte le fasi del servizio.

6. Conclusioni

I programmi, i processi e le procedure di un piano di gestione dei giunti flangiati imbullonati sono fondamentali per il funzionamento sicuro e affidabile di impianti chimici e petrolchimici.

Il piano di gestione dei giunti potrà essere implementato e, soprattutto, efficacemente mantenuto soltanto se vi è un forte coinvolgimento da parte di tutti coloro che prendono parte al processo: utilizzatori, appaltatori, ispettori. Senza la convinta collaborazione di tutti gli attori, qualunque piano è destinato al fallimento.

7. Bibliografia

[1] Energy Institute. Guidelines for the management of the integrity of bolted joints for pressurised systems. IP Publication, June 2007, Second edition.

[2] ASME PCC-1-2022 Guidelines for Pressure Boundary Bolted Flange Joint Assembly.

[3] UNI EN 1591-4: 2013 Flange e loro giunzioni - Parte 4: Qualificazione delle competenze del personale per il montaggio delle connessioni bullonate nei sistemi pressurizzati in servizio critico.

[4] Best practises of a joint integrity program. Neil Ferguson, Inspectioneering Journal, 2014.

Analisi di rischio per LNG carrier in area portuale con il supporto di metodologie avanzate: approccio combinato fluidodinamica computazionale (CFD) e analisi termostrutturale (FEM)

G. Romano, A. Romano, A. Mormile

¹ Romano Safety Management S.t.P.

Abstract

L'utilizzo di GNL (Gas Naturale Liquefatto) nello scenario energetico nazionale ed internazionale è notevolmente incrementato a causa delle criticità legate all'approvvigionamento di gas naturale dalla Russia. In particolare, l'utilizzo di FSRU (Floating Regassification Storage Unit) e di unità navali di rifornimento LNGC (Liquified Natural Gas Carrier) sono attualmente una delle soluzioni adottate dai vari governi nazionali nell'immediato e nei prossimi anni. L'articolo propone l'illustrazione di una analisi di rischio della fase di bunkeraggio, ed in particolare dell'operazione "ship to ship" con trasferimento del GNL tra le due unità navali. Lo scenario incidentale, seppur remoto, è stato valutato tenendo conto della particolare tecnologia utilizzata per il trasferimento di GNL e tenendo conto delle precauzioni tecniche e gestionali tipicamente previste per questo tipo di operazioni. La geometria influenza notevolmente il potenziale scenario di perdita di GNL a mare tra le due unità navali: per questo motivo è stato ricostruito un accurato modello 3D in grado di schematizzare nella successiva fase di modellazione l'andamento sia dell'evaporazione di GNL che dello scenario di incendio. Particolare attenzione viene posta ai criteri e alle modalità di simulazione dello scenario incidentale di incendio di GNL, condotta con il supporto della fluidodinamica computazionale (CFD). Successivamente gli esiti della simulazione di incendio sono integrati con modello agli elementi finiti (FEM) per valutare la risposta strutturale dello scafo sotto l'azione del carico termico generato dallo scenario di incendio più conservativo.

Keywords: GNL, Analisi di rischio, FEM, Seveso, CFD, Sicurezza.

1 Introduzione

Lo scopo dello studio condotto è quello di presentare un approccio integrato e quantitativo per accoppiare gli scenari derivanti dall'Analisi di Rischio svolta con metodologie tradizionali con una corretta valutazione del fenomeno incidentale indagato in modo specifico con la CFD per quanto concerne gli aspetti termici e successivamente con un modello FEM per gli aspetti strutturali.

Suddetto approccio permette di utilizzare i dati di output derivanti dall'ARI come dati di input per le analisi CFD e in maniera analoga i dati output derivanti dalla CFD come dati di input per le analisi FEM.

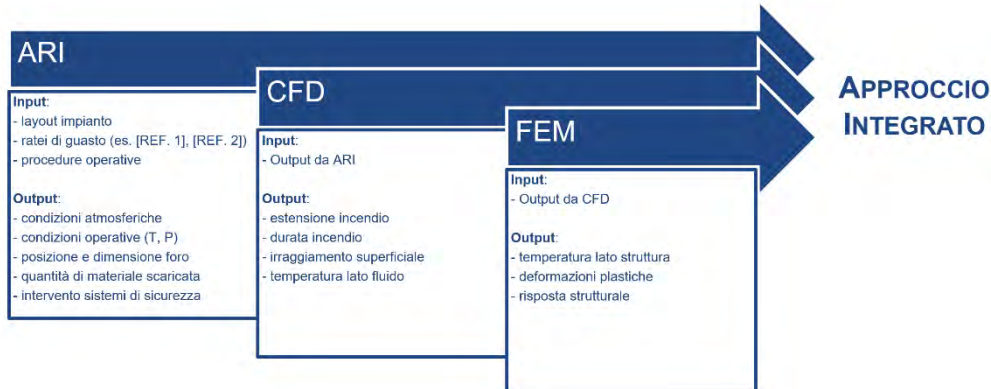


Figura 1. Schematizzazione dell'approccio integrato tra analisi di rischio tradizionale e metodi di simulazione avanzati

Al fine di costituire un modello tridimensionale funzionale alle simulazioni CFD e FEM e utile all'individuazione delle parti costituenti la FSRU, è stato sviluppato un modello della FSRU e del contesto nel quale questa si inserisce.

Il modello è stato realizzato mediante l'utilizzo di software di modellazione 3D free form (Rhino®, MOI 3D®) e BIM (Revit®) a partire dai disegni 2D, piante sezioni e prospetti di progetto della FSRU e dalle planimetrie e sezioni a disposizione della banchina. Inoltre, alcuni elementi sono stati realizzati a partire da altri modelli tridimensionali a disposizione, riadattati alle caratteristiche del presente impianto. Inoltre, sono state replicate fedelmente le strutture primarie e secondarie dello scafo, i materiali e gli spessori tra lo scafo e il serbatoio GNL preso a riferimento per la modellazione. Nel seguito si riporta la ricostruzione in 3D del progetto nella sua interezza.



Figura 2. Ricostruzione 3D della FSRU e della nave metaniera

Lo scenario analizzato consiste in una rottura parziale (random) con perdita da foro pari al 20% n. 1 manichetta flessibile DN14 di trasferimento LNG tra le due navi durante le operazioni di travaso di GNL tra la FSRU (ormeggiata in banchina) e la nave metaniera (operazioni cosiddette "ship to ship") con conseguente rilascio di GNL a mare, nel corridoio tra le due navi, considerando l'attivazione da remoto del sistema ESD (fermata delle pompe cargo stop e chiusura valvole ESD per entrambe le navi). Tale scenario comporta innanzitutto la formazione di una pozza di GNL liquido sulla superficie del mare; successivamente la nube di vapore che si forma sulla quota parte di liquido subisce un passaggio rapido di fase che ne favorisce la diluizione in aria e quindi la dispersione.

In funzione della tipologia di innesco (immediato o ritardato) possono configurarsi i seguenti scenari potenziali: in caso di innesco ritardato, il riscaldamento del prodotto a contatto con la superficie del mare comporta l'evaporazione del GNL e la successiva formazione di una nuvola in condizioni di infiammabilità che potrebbe dar luogo al fenomeno di flash fire; nell'ipotesi di innesco immediato, l'incendio che ne deriva si configura come un pool fire localizzato nel corridoio tra le due navi che è stato successivamente sottoposto ad un'indagine strutturale dello scafo della nave (e del serbatoio LNG) sottoposto all'azione termica dell'incendio per valutare possibili danni strutturali tali da comprometterne l'integrità mediante analisi FEM.

Le simulazioni FEM hanno tenuto conto di due tipologie di carichi: carichi permanenti (meccanici), dovuti alle pressioni che agiscono sulla struttura (pressione interna del GNL e pressione esterna dell'acqua e carichi da incendio (termico) che impongono una variazione di temperatura sulla superficie esterna del mantello esterno della FSRU.

Complessivamente sono state condotte un totale di 11 simulazioni, comprensive anche di analisi di ventilazione e di simulazioni di dispersione ed esplosione. Nel prosieguo della trattazione verranno trattati esclusivamente i casi di incendio che sono stati utilizzati per lo sviluppo dell'approccio integrato tra ARI, CFD e FEM.

2 Studio di fluidodinamica computazionale (CFD) con simulazione del rilascio di GNL durante le operazioni ship to ship e caratterizzazione degli scenari di incendio

Per le simulazioni è stato utilizzato il codice di calcolo FLACS® (FLame ACceleration Simulator) [REF. 3], sviluppato e distribuito dalla società GEXCON.

Il software FLACS è riconosciuto a livello mondiale ed è ampiamente utilizzato nel settore industriale, accademico e della investigazione post incidentale: si citano ad esempio gli incidenti della piattaforma petrolifera Piper Alpha (Mare del Nord, 1988), del deposito di petrolio di Buncefield (Inghilterra, 2005) e della piattaforma di perforazione Deepwater Horizon (2010) [REF. 4].

Ulteriori referenze di letteratura disponibili sono Università di Bergen (Norvegia) [REF. 5], HSE UK [REF. 6] e altre fonti ([REF. 7], [REF. 8], [REF. 9] e [REF. 10])

Per ognuna delle simulazioni CFD condotte è stato necessario condurre tre operazioni preliminari:

- 1) generazione della griglia di calcolo e della porosità;
- 2) definizione delle condizioni atmosferiche;
- 3) definizione del termine sorgente e conseguente evaporazione del GNL.

2.1 Griglia di calcolo e porosità

Il dominio complessivo delle simulazioni è di 665m x 230m x100m, per un totale di 335.120 celle suddivise in un dominio ristretto (core domain) aventi celle di dimensione compresa tra 0,5 e 1m e in un dominio allargato (total domain) caratterizzato da un fattore di stiramento (stretch factor) del 15% circa.

Flacs Geometry Calculator (FGC) è il software utilizzato per il calcolo delle porosità di area e di volume.

Una delle caratteristiche chiave che distingue FLACS-CFD dalla maggior parte dei codici CFD commerciali è l'uso del concetto di porosità distribuita per rappresentare geometrie complesse su mesh computazionali relativamente grossolane. Con questo approccio, gli oggetti e le pareti di grandi dimensioni (grandi rispetto ai volumi di controllo identificati mediante la griglia di calcolo) sono rappresentati sulla griglia, mentre gli oggetti più piccoli vengono tradotti in porosità equivalente, dove il campo di porosità rappresenta la congestione locale e il confinamento. Ciò consente agli oggetti più piccoli di contribuire come resistenza al flusso e generazione di turbolenza.

L'immagine seguente mostra la geometria della FSRU e della nave metaniera a quota $z = 1\text{ m}$ dal livello del mare e la traduzione della stessa in porosità di volume (superfici viola) e di area (linee rosa).

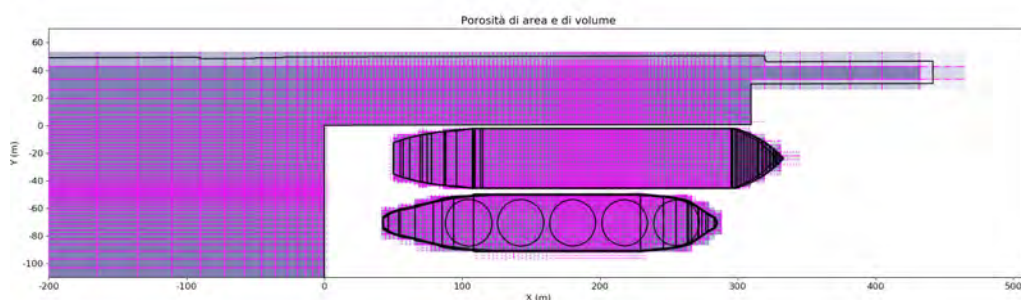


Figura 3. Rappresentazione della geometria con indicazione delle porosità di volume e di area

2.2 Condizioni atmosferiche

Sulla base di quanto definito al paragrafo 4.2 dell'Allegato C al D.L. 26 giugno 2015, n. 105, le velocità del vento assunte per le simulazioni sono pari a 2 m/s e 5m/s ad una quota di 10m.

Per quanto riguarda la caratterizzazione della direzione del vento, invece, è stata utilizzata la rosa dei venti riferita all'anno 2021 per la centralina di Livorno (Fonte: sito della Rete Mareografica Nazionale RMN del Servizio Mareografico Nazionale dell'ISPRA) da cui è stato possibile individuare la direzione Nord-Est come direzione prevalente del vento.

2.3 Termine sorgente ed evaporazione della pozza di GNL

Lo scenario oggetto delle simulazioni prevede la rottura parziale del tratto di tubazione flessibile tra le due navi e successivo rilascio di GNL a mare. L'origine del rilascio è stata posta in corrispondenza della zona in cui sono presenti le manichette di carico, approssimativamente a metà della lunghezza della FSRU.

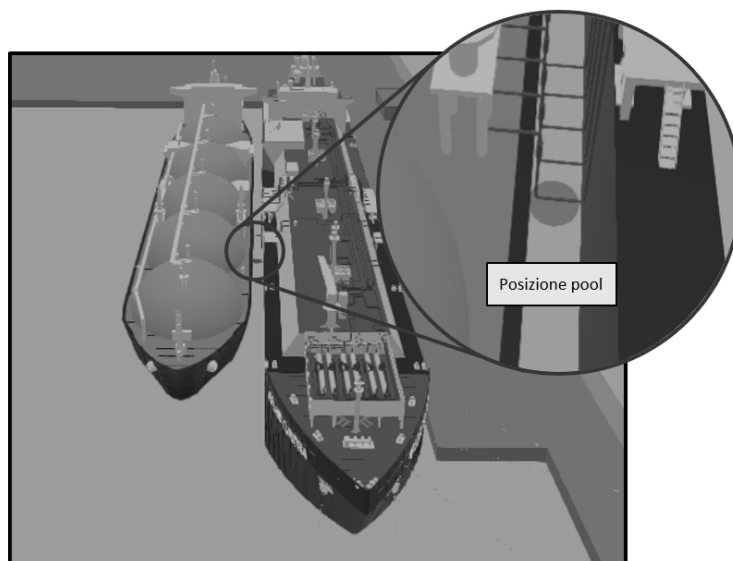


Figura 4. Dettaglio del punto di rilascio

La composizione del GNL utilizzata per i calcoli è quella specifica di ingresso al terminale. Il quantitativo complessivo di GNL considerato per la simulazione CFD è pari a circa 6000 kg, calcolato come somma della portata di scarico dell'ipotesi di rottura parziale (40 kg/s) per una durata di 150 secondi sommato all'hold up del tratto flessibile di 1 manichetta (800 kg di GNL).

Nella simulazione proposta all'interno del presente studio non sono considerati interventi di mitigazione come raffreddamento/soffocamento/spegnimento nelle fasi di evaporazione e incendio.

Come si evince dall'andamento della massa di GNL evaporato in funzione del tempo, la durata complessiva del fenomeno di evaporazione è di circa tre minuti e mezzo:

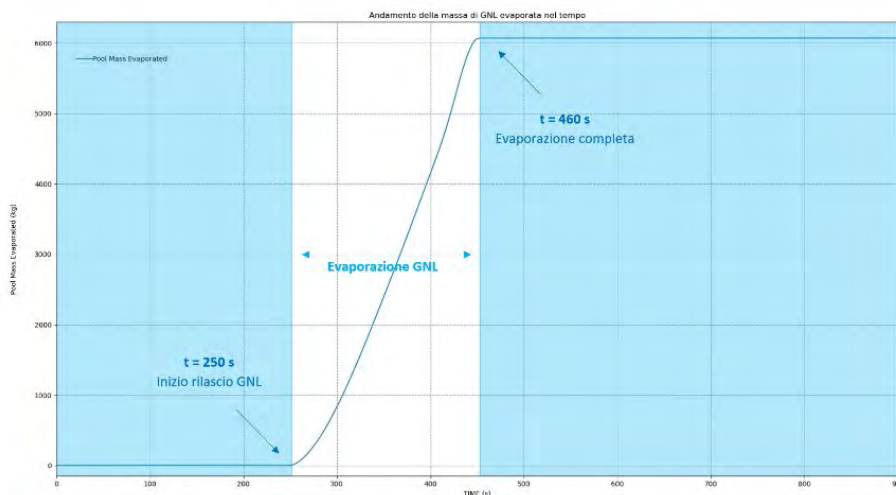


Figura 5. Andamento della massa di GNL evaporata nel tempo

Complessivamente, la persistenza della nube in condizioni di infiammabilità fino alla completa dissoluzione in assenza di innesco ha una durata di 7 min 30 s.

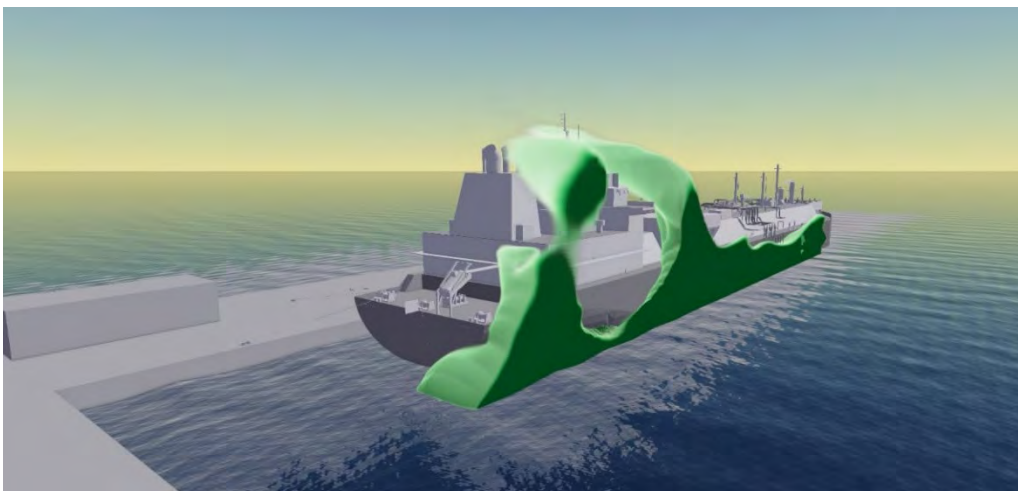


Figura 6. Rappresentazione della nube in condizioni di infiammabilità (**la LNGC è stata volutamente occultata per permettere la vista del gas intrappolato nel corridoio tra le due navi**)

2.4 Incendio della nube infiammabile

Al fine di fornire una valutazione approfondita di tutte le possibili casistiche di innesco della nube infiammabile di cui al capitolo precedente, sono state svolte due diverse simulazioni per ogni classe atmosferica:

- **Innesco immediato:** volendo massimizzare la durata del fenomeno e il conseguente impatto strutturale, si è scelto di innescare la nube non appena la concentrazione di GNL all'interno di una qualsiasi cella della griglia entra nel campo di infiammabilità.
- **Innesco ritardato:** volendo massimizzare il carico termico e il picco di sovrappressione potenzialmente sviluppabile, si è scelto di innescare la nube in

corrispondenza dell'istante temporale in cui si ha il massimo volume di gas nel campo di infiammabilità.

In entrambi i casi il modello utilizzato per il calcolo dell'evaporazione della pozza include il contributo dall'irraggiamento della fiamma.

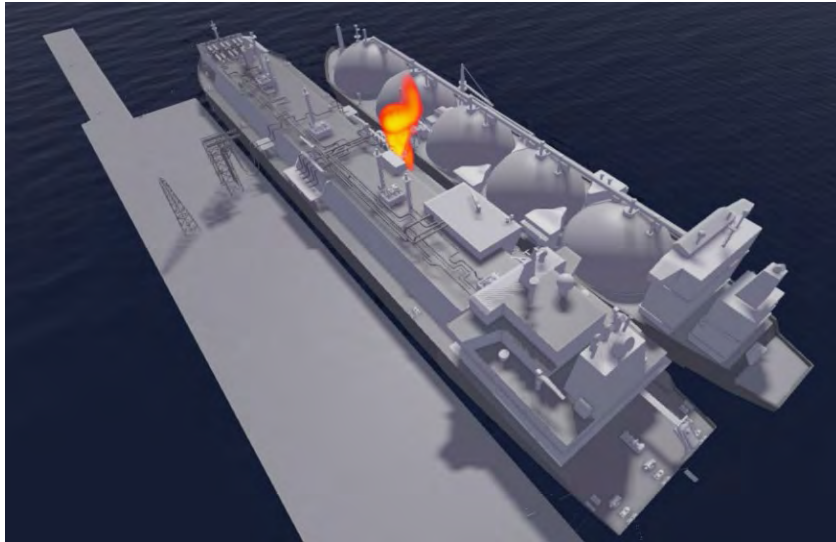


Figura 7. Rappresentazione di uno scenario di incendio con innesco immediato

Il caso di innesco immediato risulta di maggior interesse ai fini dell'approccio integrato in quanto è quello che massimizza il carico termico sulla fiancata e di conseguenza quello utilizzato per le analisi FEM. La regione potenzialmente infiammabile è stata assunta pari al volume di simulazione stesso (665m x 230m x 100m).

In tutte le simulazioni di tipo "fire", le temperature di fiamma medie si attestano intorno a 2.100 °C, mentre le durate vanno dai 15 secondi (innesco ritardato) agli oltre 3 minuti (innesco immediato), con altezze di fiamma massime di circa 100 metri.

Nella figura successiva sono mostrati gli involuipi su tutto il dominio dei valori di irraggiamento termico in corrispondenza delle soglie 3, 5, 7, 12,5 e 37,5 kW/m², in analogia ai criteri di rappresentazione richiesti dal DM 9 maggio 2001. Nello specifico, si è scelto di rappresentare i risultati di una simulazione con innesco immediato in quanto trattasi della simulazione utilizzata per ottenere i valori di input per la successiva analisi FEM.

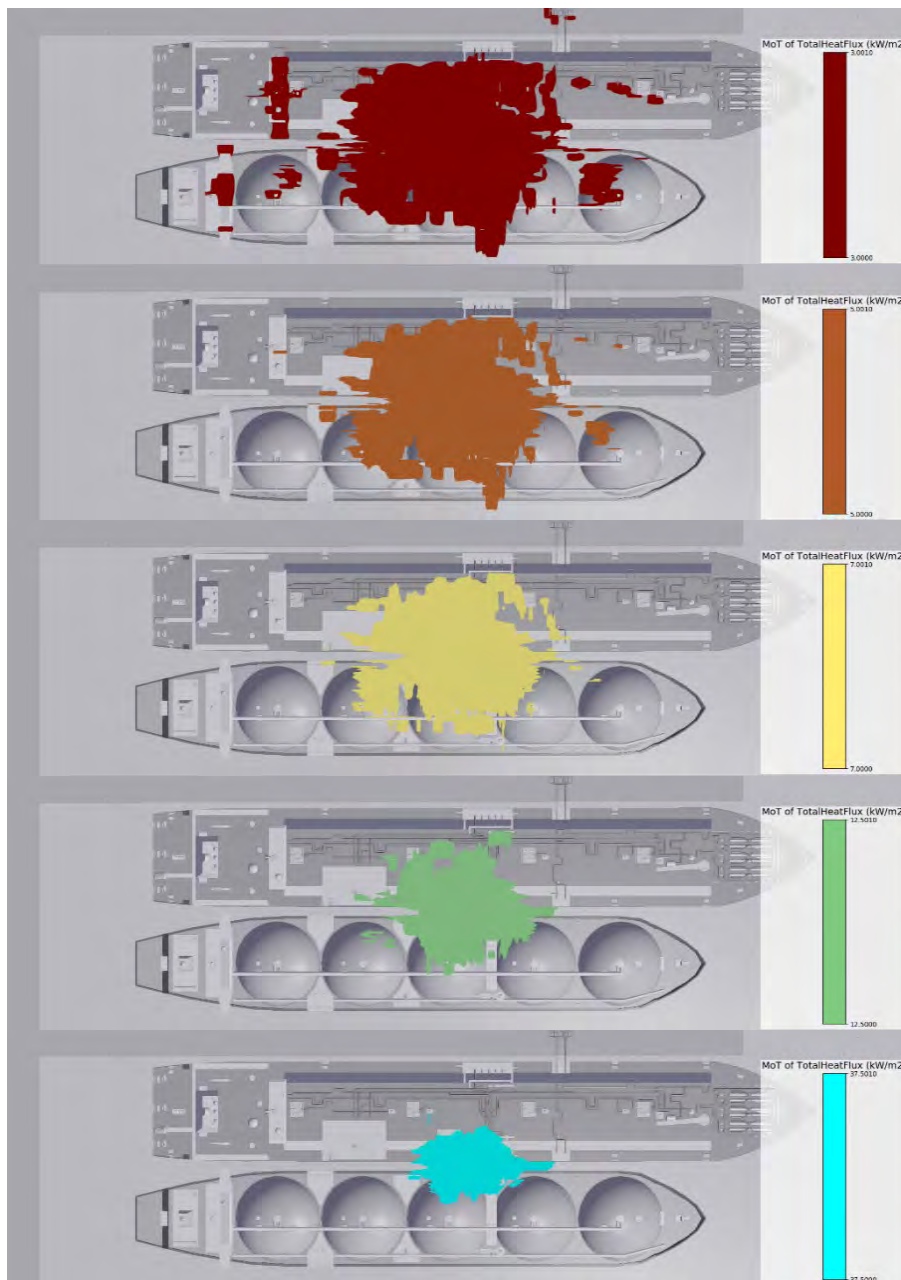


Figura 8. Soglie di irraggiamento per pool fire con innesco immediato e classe di stabilità atmosferica 5D

3 Modellazione agli elementi finiti (FEM) per la valutazione della risposta strutturale dello scafo ai carichi generati dagli scenari di incendio

3.1 Integrazione dei risultati FLACS (CFD) nel modello ad elementi finiti (FEM)

LS-DYNA® è un codice ad elementi finiti (FEM) largamente utilizzato per le simulazioni strutturali. Storicamente LS-DYNA® nasce per fare simulazioni di esplosioni; quindi, ha la capacità intrinseca di simulare fenomeni in cui si verificano grandi deformazioni a seguito di onde d'urto o grandi variazioni di temperatura che si verificano in tempi brevi, rendendolo il software più adatto nella simulazione di fenomeni di collasso a seguito di incendi.

Per poter integrare l'analisi termica CFD con l'analisi strutturale FEM si è fatto riferimento all'approccio proposto in [REF. 11], consistente nella definizione di una Temperatura Adiabatica di Superficie (AST) relativa alle temperature della superficie esposta della fiancata della nave. Tale approccio si basa sulla risoluzione dei bilanci di energia lato fluido mediante CFD e lato struttura mediante FEM, come sintetizzato nel seguente sistema di equazioni:

$$\begin{cases} \dot{q}_{net,CFD}'' = \varepsilon \cdot (\dot{q}_{inc}'' - \sigma \cdot T_{AST}^4) + h \cdot (T_g - T_{AST}) = 0 & (1) \\ \dot{q}_{net,FE}'' = \varepsilon \cdot (\sigma \cdot T_{g,eff}^4 - \sigma \cdot T_s^4) + h \cdot (T_{g,eff} - T_s) & (2) \end{cases}$$

In particolare, facendo riferimento all'espressione (1) e considerando i parametri e le variabili risolventi disponibili in un calcolo FLACS[®], ε è un dato di input (emissivity), σ è una costante universale (Stefan-Boltzmann constant), \dot{q}_{inc}'' (incident radiative heat flux), h (convective heat transfer coefficient) e T_g (gas temperature) sono variabili risolventi disponibili come output ai monitor points: attraverso una serie di punti di monitoraggio (MP), è possibile ricavare in FLACS[®] l'andamento temporale puntuale delle variabili termiche di interesse (\dot{q}_{inc}'' , h , T_g). Una volta nota T_{AST} per ogni MP e per ogni istante temporale, è possibile sostituirla a $T_{g,eff}$ in (2) e porre $\dot{q}_{net,FE}'' = 0$ in modo da ricavare la temperatura superficiale dello scafo della nave.

Al fine di ricavare T_{AST} , nel modello FLACS è stata definita una griglia di 406 punti di monitoraggio dei risultati in corrispondenza del tratto di fiancata investito dalla fiamma, all'altezza dei serbatoi di GNL. I MPs sono arrangiati a circa 2m di distanza gli uni dagli altri secondo una griglia rettangolare composta da 14 righe e 21 colonne. Il pattern di MPs è illustrato nelle figure seguenti.

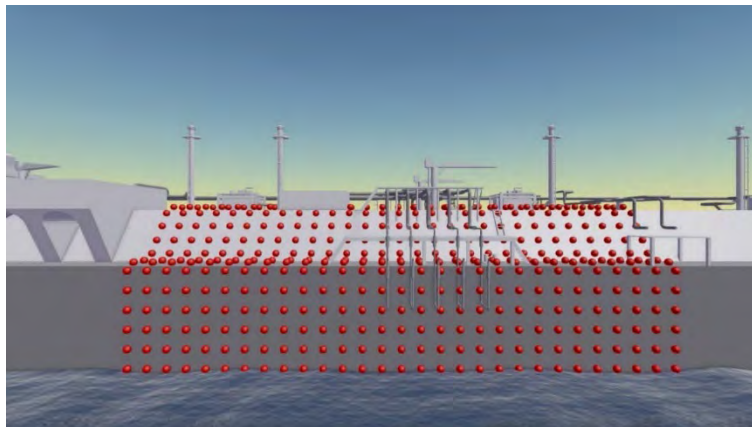


Figura 9. Dettaglio dei monitor points per l'estrazione dei dati da FLACS[®]

3.2 Materiali utilizzati nella simulazione termo-meccanica

Dal punto di vista meccanico, il materiale considerato per la realizzazione del modello dell'imbarcazione è identificato dalla sigla S235 e rappresenta un acciaio strutturale del tipo MILD STEEL GRADE "A" avente una tensione di snervamento pari a 235 Mpa. Dal punto di vista termico, è possibile considerare un materiale metallico, e quindi anche il materiale in questione, come isotropo (le caratteristiche sono uguali in tutte

le direzioni). In LS-DYNA il modello di materiale adatto a simulare il comportamento di un materiale come questo è il *MAT_THERMAL_ISOTROPIC (*MAT_T01). Stante quanto sopra, tra le centinaia di modelli di materiale presenti in LS-DYNA, tenuto conto del tipo di simulazione da effettuare, si è scelto di utilizzare il *MAT_ELASTIC_PLASTIC_THERMAL (*MAT_004) essendo il miglior modello matematico di materiale in grado di simulare il comportamento elasto-plastico (tipico dei materiali metallici) al variare della temperatura. Questo modello necessita dei seguenti dati di input, che sono stati forniti in funzione della temperatura: modulo di Young, coefficiente di Poisson, densità, coefficiente di dilatazione termica, tensione di snervamento e modulo tangente.

3.3 **Analisi termo-meccanica per la simulazione di incendio**

Per poter studiare il fenomeno in questione, è stato realizzato un modello 3D del troncone di nave su cui insiste l'incendio di cui alla precedente analisi CFD. A tale scopo sono state imposte delle condizioni al contorno meccaniche (vincoli) per fare in modo che il modello tenga conto del fatto che il troncone da noi utilizzato per le analisi è collegato al resto della struttura della FSRU che anch'esso si dilata.

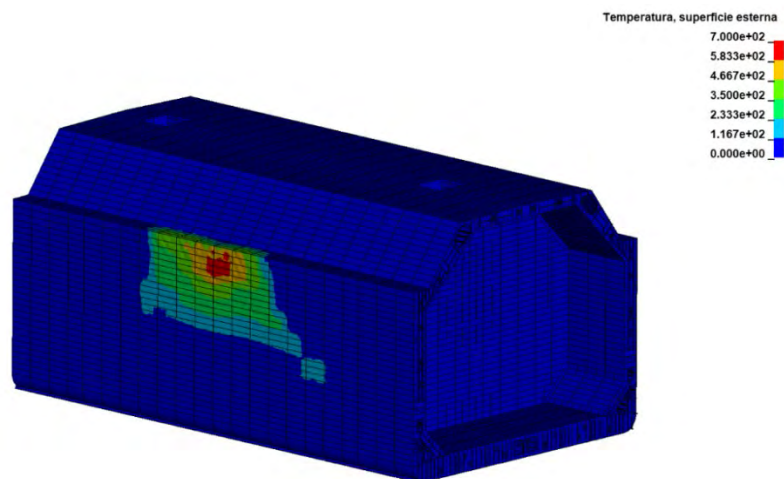


Figura 10. Ricostruzione 3D del troncone di scafo della FSRU

Per quanto riguarda le condizioni al contorno termiche, è necessario ricordare che la metaniera è circondata da due "ambienti":

- La superficie esterna superiore della nave è immersa nell'aria; quest'ultima, ad una distanza sufficiente dall'evento, ha una data temperatura (nel calcolo 20°C), quindi per convezione potrà scambiare calore con la struttura.
- La superficie esterna bassa della nave sarà immersa in acqua: esattamente come per l'aria, questa potrà scambiare calore con la nave.

Entrambe le superfici sono state definite attraverso il *SET_SEGMENT, presenti all'interno del codice di calcolo LS-DYNA® ed utili per definire superfici nel modello. Per tenere conto di questi due effetti, si sono imposte due condizioni al contorno ci

convezione (*BOUNDARY_CONVECTION_SET) con i rispettivi coefficienti di scambio termico. Sono stati inoltre considerati i seguenti carichi esterni:

- Carichi permanenti (meccanici), dovuti alla gravità ed alle pressioni che agiscono sulla struttura (pressione interna del metano e pressione esterna sullo scafo dell'acqua); queste forze sono tra loro auto equilibrate, ma impongono alla struttura uno stato tensionale "statico" e permanente.
- Carico da incendio che impone una variazione di temperatura sulla superficie esterna del mantello esterno della metaniera.

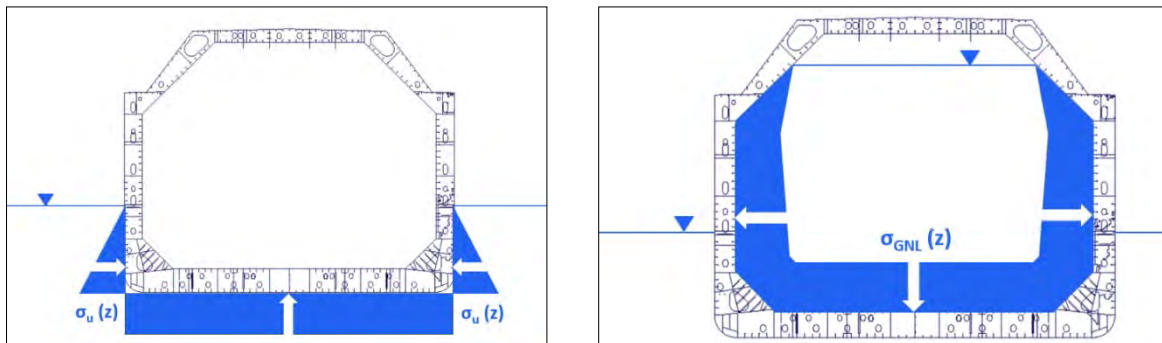


Figura 11. Rappresentazione dei carichi permanenti esterno (acqua) e interno (GNL)

Le pareti dello scafo, soggette ad una pressione con andamento in alcuni casi lineare e in altri costante, sono state divise in diversi settori per ognuno dei quali l'andamento delle pressioni viene considerato costante e calcolato come valore medio fra il minimo e il massimo della zona considerata. La pressione risultante è stata applicata sullo scafo definendo in LS-DYNA® dei *SET_SEGMENT. In questo modo il codice applica il valore di pressione costante ortogonale alla superficie.

I carichi esterni dovuti all'incendio sono stati inseriti come temperatura imposta derivante dall'analisi precedente fatta con FLACS®, così come ampiamente discusso nei capitoli precedenti. Per le analisi sono stati considerati 2 scenari di calcolo: effetto dei carichi termici, senza i carichi permanenti, ed effetto dei carichi termici considerando anche i carichi permanenti.

3.4 Scenario con soli carichi termici

Considerando l'effetto dei soli carichi termici si ottiene che la superficie esterna e quella interna del mantello esterno hanno temperature leggermente diverse. Ciò è dovuto al fatto che il fenomeno analizzato è transitorio e l'incendio si sposta durante il fenomeno riscaldando zone diverse della metaniera; il tempo in cui insiste su una zona non è sufficiente a portare l'intero spessore della lamiera alla stessa temperatura. Inoltre, il tempo di azione dell'incendio non è sufficiente a riscaldare in maniera sensibile la superficie interna del mantello interno della metaniera stessa.

In merito alle deformazioni plastiche, i risultati ottenuti evidenziano che il mantello interno non subisce alcuna deformazione plastica, mentre quello esterno ha una

deformazione plastica sempre inferiore al 5%. La deformazione plastica al termine del fenomeno è l'involuppo della storia temporale del fenomeno; quindi, è una fotografia dello stato della struttura al termine dell'incendio.

Il materiale di cui è composta la metaniera ha un valore di rottura al 25% di deformazione plastica a temperatura ambiente, mentre si attesta a valori più alti al crescere della temperatura; quindi, è possibile affermare che la struttura è molto lontana da valori critici di rottura. Si nota inoltre che la deformazione plastica avviene nel momento in cui si ha il passaggio dell'incendio e che non varia successivamente.

3.5 Scenario con carichi termici e carichi permanenti

In questo scenario si è voluto considerare la sovrapposizione dei carichi termici con quelli permanenti. Poiché i carichi permanenti non hanno effetto sulla distribuzione di temperatura, quest'ultima rimarrà invariata rispetto allo scenario relativo ai soli carichi termici. L'immagine successiva mostra che anche in questo caso la deformazione plastica rimane sempre al di sotto del 5% e che non si notano sostanziali differenze nella distribuzione di deformazioni plastiche, questo perché i carichi permanenti non portano la struttura ad uno stato tale da deformare plasticamente e l'introduzione del carico termico non comporta un accoppiamento degli sforzi. In conclusione, la sommatoria dei carichi non porta la struttura ad essere critica.

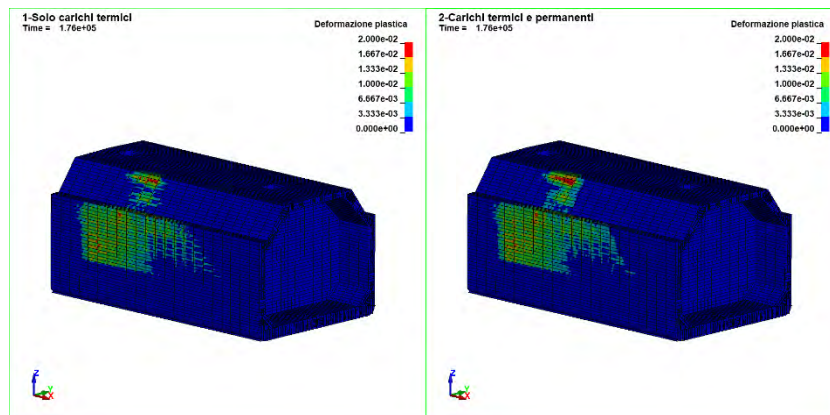


Figura 12. Confronto deformazioni plastiche della simulazione con soli carichi termici (sinistra) e di quella con carichi permanenti compresi (destra)

4 Conclusioni

Lo scopo dello studio condotto è quello di presentare un approccio integrato e quantitativo per accoppiare gli scenari derivanti dall'Analisi di Rischio svolta con metodologie tradizionali con una corretta valutazione del fenomeno incidentale indagato in modo specifico con la CFD per quanto concerne gli aspetti termici e successivamente con un modello FEM per gli aspetti strutturali. Attraverso le tecniche dell'analisi di rischio tradizionale sono state identificate le condizioni operative e il conseguente termine sorgente: la rottura parziale (random) con perdita di GNL da

foro pari al 20% di n. 1 manichetta flessibile DN14 di travaso LNG tra la FSRU (ormeggiata in banchina) e la LNGC (operazioni cosiddette "ship to ship") con conseguente rilascio di GNL a mare, nel corridoio tra le due navi, considerando l'attivazione da remoto del sistema di emergenza. Tale scenario ha comportato innanzitutto la formazione di una pozza di GNL liquido sulla superficie del mare; successivamente la pozza subisce un passaggio rapido di fase da liquido a gassoso che ne favorisce la diluizione in aria e quindi la dispersione.

Al fine di massimizzare il carico termico sulla fiancata da sottoporre alle successive analisi FEM è stato ipotizzato un innesco immediato della pozza di GNL, il cui incendio si configura come un pool fire localizzato nel corridoio tra le due navi.

Per le simulazioni di suddetto scenario è stato utilizzato il codice di calcolo FLACS[®] (FLame ACceleration Simulator) sviluppato e distribuito dalla società GEXCON. Gli output termici ottenuti con le simulazioni CFD sono stati rimaneggiati secondo l'approccio proposto in [REF. 11] al fine di ricavare una temperatura adiabatica superficiale che potesse essere utilizzata come input per l'analisi strutturale mediante modello FEM, allo scopo di valutare la possibilità di danni strutturali tali da compromettere l'integrità dello scafo della FSRU, che si porta intorno ai 700°C.

Per le simulazioni strutturali si è fatto affidamento al software LS-DYNA[®], un codice ad elementi finiti largamente utilizzato per le simulazioni strutturali.

Le simulazioni FEM hanno tenuto conto sia dei carichi permanenti (meccanici) dovuti alla gravità e alle pressioni che agiscono sulla struttura (pressione interna del metano e pressione esterna sullo scafo dell'acqua, sia del carico da incendio (termico) che impone una variazione di temperatura sulla superficie esterna del mantello esterno della FSRU. Il parametro di riferimento identificato per la valutazione dei risultati è stato la deformazione plastica, il cui valore si è attestato intorno al 3% (il valore limite è del 25% circa) e pertanto ha dimostrato che in nessun caso il mantello esterno della FSRU raggiunge uno stato di sollecitazione tale da portare al collasso la struttura stessa.

Da questo studio sono emerse quindi tutte le potenzialità di un approccio integrato all'analisi di rischio, che attraverso l'utilizzo di software specifici, altamente avanzati e in grado di dare un concreto supporto alla progettazione, permette di valutare le conseguenze di un evento incidentale in maniera quantitativa e caso-specifica.

Bibliografia

- [REF. 1] TNO (2005), Purple book: Guideline for quantitative risk assessment.
- [REF. 2] OREDA participant (2009), Offshore Reliability Data Handbook, 5th Edition.
- [REF. 3] GEXCON (2022), FLACS-CFD v22.1r2 User's Manual.
- [REF. 4] BRITISH PETROLEUM (2010), Deepwater Horizon Accident Investigation Report, Executive Summary.
- [REF. 5] UNIVERSITY OF BERGEN (2014), Department of Physics and Technology, Bergen Norway, Interpretation of geometrical effects in consequence modelling. Comparison study between the commercial consequence assessment tools FLACS and PHAST for flammable gas dispersion.
- [REF. 6] Health and Executive Laboratory for Health and Safety Executive (2010), Review of FLACS version 9.0, Dispersion modelling capabilities, Research Report RR779.
- [REF. 7] S.B. (2000) Turbulent Flows, Cambridge University Press.
- [REF. 8] Franke, J., Hellsten, A., Schlünzen, H. and Carissimo, B. (2007) Best practice guideline for the CFD simulation of flows in the urban environment, COST Action 732: Quality Assurance and Improvement of Microscale Meteorological Models.
- [REF. 9] Hissong D.W., (2007) Keys to modeling LNG spills on water, ExxonMobil Upstream Research Company, Houston, TX, USA.
- [REF. 10] Hightower M. et al., (2004) Guidance on Risk Analysis and Safety Implications of a Large Liquefied Natural Gas (LNG) Spill Over Water, Sandia National Laboratories, Albuquerque, New Mexico.
- [REF. 11] R.K. Janardhan, S. Shaki, W. Lu, S. Hostikka, J. Puttonen: "Coupled CFD-FE analysis of a long-span truss beam exposed to spreading fires", Engineering Structures, 25 March 2022

Applicazione di una metodologia di analisi dei rischi ad un modello di economia circolare finalizzato alla produzione di poliidrossialcanoati

R. Lauri¹, E. Incocciati², F. Valentino³, B. Pietrangeli¹

¹Inail - Dit

²Inail - Consulenza Tecnica per la Salute e la Sicurezza Centrale

³Università Ca' Foscari Venezia – Dip. di Scienze Ambientali, Informatica e Statistica

Abstract

Il presente articolo propone l'applicazione della tecnica di analisi Hazop alla valutazione dei rischi dei processi industriali. Questa metodologia si basa su una procedura strutturata, che consente di migliorare la sicurezza e l'efficienza di un dato processo produttivo, esaminando le possibili deviazioni dai relativi intenti progettuali dei parametri operativi relativi ad uno specifico "nodo" (componente dell'impianto sotto esame), al fine di individuare opportuni interventi correttivi attraverso l'implementazione di misure di prevenzione e protezione. La novità del lavoro è rappresentata dall'applicazione della suddetta tecnica ad un impianto pilota finalizzato all'attuazione di un modello di economia circolare, basato sull'utilizzo della frazione organica dei rifiuti solidi urbani (Forsu) e di fanghi di depurazione per produrre biopolimeri biodegradabili (poliidrossialcanoati), che vengono principalmente impiegati nel packaging e in ambito alimentare.

Keywords: economia circolare, analisi Hazop, deviazioni, sicurezza.

1. Introduzione

Essendo la maggior parte delle materie plastiche sintetiche non degradabili naturalmente e considerando l'ingente utilizzo, la questione del loro smaltimento alla fine del ciclo di vita rappresenta un enorme problema sotto i profili ambientale e socioeconomico. Inoltre, le plastiche derivate dal petrolio, rappresentano una risorsa non rinnovabile e quindi in costante diminuzione nel tempo. Per tali motivazioni, in molti Paesi è stata avviata la ricerca di nuovi materiali, le "bioplastiche", che sostituissero le materie plastiche sintetiche più utilizzate e che fossero anche biodegradabili. I poliidrossialcanoati (PHA) rappresentano una classe di poliesteri termoplastici molto ampia, che comprende più di 100 polimeri, ottenuti da diversi monomeri di partenza. Attualmente la produzione di PHA da rifiuti industriali, quali la Forsu (frazione organica dei rifiuti solidi urbani), e da fanghi di depurazione degli scarti delle lavorazioni agroindustriali, riveste un ruolo strategico per la produzione di manufatti ecosostenibili attraverso modelli di economia circolare [7]. Inoltre, la

maggior consapevolezza ambientale e la legislazione europea sul divieto dell'impiego di prodotti di plastica monouso (EU-PDD, 2019) determineranno un rapido aumento della richiesta dei PHA, il cui mercato globale dovrebbe raggiungere i 167 milioni di dollari entro il 2027, con un tasso di crescita annuale (CAGR) del 15,3%, rispetto agli 81 milioni di dollari del 2022 [4]. Partendo da questo scenario, la presente memoria è stata focalizzata sull'applicazione della tecnica di analisi Hazop (Hazard and Operability), che viene usata per la valutazione dei rischi dei processi industriali. Questa metodologia si basa su una procedura strutturata, la quale consente di migliorare la sicurezza e l'efficienza di un dato processo produttivo, esaminando le possibili deviazioni, dai relativi intenti progettuali, dei parametri operativi relativi ad uno specifico "nodo" (componente dell'impianto sotto esame), al fine di individuare opportuni interventi correttivi attraverso l'implementazione di adeguate misure di prevenzione e protezione. L'elemento maggiormente innovativo del lavoro svolto è rappresentato dall'applicazione della suddetta tecnica ad un impianto pilota, situato a Treviso, e, più specificamente, al nodo del processo rappresentato dal reattore di fermentazione. In quanto progettato e realizzato all'interno di un'unità di trattamento delle acque reflue del comune di Treviso, l'impianto è finalizzato all'attuazione di un modello di economia circolare, basato sull'utilizzo della Forsu e di fanghi di depurazione per produrre PHA. Basandosi sui risultati dell'analisi Hazop, è stato disegnato, mediante uno specifico software (M4 P&ID FX), un P&ID (Piping and Instrumentation Diagram), che costituisce lo step progettuale di partenza per la realizzazione su scala reale del nodo esaminato.

2. Materiali e metodi

La metodologia Hazop ha elevatissime potenzialità di analisi. Ciò è dovuto principalmente al fatto che si tratta di un'analisi di rischio funzionale e non di sistema e quindi può essere applicata in modo molto efficace anche nella fase preliminare del progetto (fase concettuale) e può adattarsi lungo il suo sviluppo o la sua evoluzione, guidando le scelte progettuali in termini di sicurezza e affidabilità oltre che di operabilità di impianto o di processo [6]. Inoltre, il metodo Hazop è utilissimo anche su impianti esistenti. Infatti, esso è in grado, partendo dai disegni (P&ID) del processo, qualunque sia il loro livello di dettaglio, di analizzare in modo sistematico ed esaustivo le eventuali lacune in termini di sicurezza e affidabilità [3]. L'obiettivo di tale analisi è quello di identificare le potenziali conseguenze delle deviazioni, dalle intenzioni progettuali, dei parametri operativi (pressione, temperatura, portata, etc.) riferiti ad uno specifico "nodo" (reattore, scambiatore di calore, etc.). A partire dalle conseguenze evidenziate, è quindi possibile individuare le più opportune misure in grado di migliorare la sicurezza e l'efficienza del processo industriale. La procedura di analisi Hazop si attua attraverso i seguenti step [5]:

- 1) individuazione dei nodi, che rappresentano i componenti elementari del processo;
- 2) dichiarazione delle intenzioni progettuali dei parametri operativi del nodo da esaminare;

- 3) individuazione delle parole guida (maggiore, minore, etc.) da applicare ai parametri di esercizio selezionati;
- 4) ricerca delle deviazioni dalle normali condizioni di funzionamento;
- 5) individuazione delle possibili cause, che potrebbero generare le deviazioni;
- 6) individuazione e valutazione delle conseguenze causate dalle deviazioni;
- 7) identificazione di eventuali misure di prevenzione e protezione, aggiuntive rispetto a quelle già previste.

La metodologia Hazop è basata sull'utilizzo di due strumenti:

- la matrice delle deviazioni rilevanti (tabella 1), la quale combina le parole guida (guidewords) con i parametri operativi individuati;
- il foglio di lavoro (tabella 2), che evidenzia i risultati dell'analisi effettuata.

| | |
|--------------|-------------------------------|
| | Componente di impianto (nodo) |
| Parole guida | Parametri operativi |

Tabella 1. Matrice delle deviazioni rilevanti

| | | | | |
|---------------------|-------------------------------|-------------|------------------------|-----------------------|
| | Componente di impianto (nodo) | | | |
| Parametro operativo | causa | conseguenza | Contromisure esistenti | Contromisure proposte |
| Deviazione 1 | | | | |
| Deviazione 2 | | | | |
| Deviazione n | | | | |

Tabella 2. Foglio di lavoro dell'analisi Hazop

3. Il caso studio: l'impianto pilota di Treviso

L'impianto pilota, dedicato alla produzione di PHA, si trova all'interno dell'area dell'impianto di trattamento delle acque reflue di Treviso. Il suddetto impianto fu esaminato dagli autori nell'ambito del progetto europeo "Res Urbis" per valutare i potenziali pericoli per la salute e sicurezza degli operatori. La materia prima, utilizzata per produrre il biopolimero biodegradabile, è composta da una miscela dei fanghi attivi, derivanti dal trattamento delle suddette acque, e della frazione liquida della Forsu, proveniente dalla raccolta "porta a porta" dei rifiuti urbani del comune di Treviso. Lo schema del processo è riportato in Figura 1, mentre in Figura 2 viene mostrato il reattore di fermentazione (fermentatore), che è stato oggetto dell'analisi Hazop, in quanto vi si riscontrano le maggiori criticità dal punto di vista della sicurezza degli operatori.

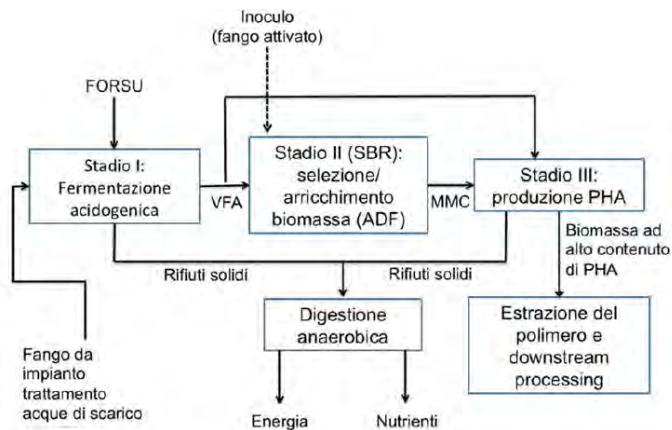


Figura 1. Fasi del processo di produzione di PHA Figura 2. Reattore di fermentazione

| Tempo di residenza idraulico (giorni) | Finestra di lavoro (giorni) | Materie prime in ingresso (v/v %) | T (°C) |
|---------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------------|--------|
| 5-6 | 140-420 | Fanghi (30%)-Forsu (70%) | 37 |

Tabella 3. Parametri operativi del fermentatore

Infatti, al suo interno si forma una miscela gassosa, contenente sostanze infiammabili, quali il metano (CH_4), l'idrogeno (H_2) e l'acido solfidrico (H_2S), il quale può risultare anche letale se inalato. Il rilascio accidentale di tale miscela nell'ambiente esterno potrebbe generare uno scenario potenzialmente pericoloso per la salute e sicurezza dei lavoratori, costituito dalla formazione di un'atmosfera potenzialmente esplosiva. Il fermentatore è un reattore agitato, incamiciato e provvisto di sistema di termostatazione per la regolazione della sua temperatura di esercizio [1], ed ha il compito di massimizzare la produzione di acidi grassi volatili (VFA), che svolgono un ruolo chiave nella generazione di PHA. Un'apposita caldaia regola il livello termico dell'acqua, circolante in camicia, e quindi la temperatura, a cui avviene la fermentazione. Il suddetto reattore è equipaggiato con una guardia idraulica per contrastare l'insorgere di sovrappressioni. L'analisi Hazop è stata effettuata, considerando le condizioni operative (tabella 3), che consentono di ottenere la massima resa del biopolimero biodegradabile [2].

4. Risultati e discussione

Nelle successive tabelle 4 e 5 si riportano, rispettivamente, i principali parametri (portata dei reagenti, temperatura, pressione, etc.) operativi del reattore di fermentazione, presi in considerazione dall'analisi Hazop, ed i risultati, a cui si è giunti. In particolar modo, la matrice delle deviazioni rilevanti consente di evidenziare le correlazioni esistenti (contrassegnate da una lettera X nella casella) tra le parole guida e le grandezze, che rivestono una maggiore rilevanza per l'esercizio del fermentatore. Gli acronimi HRT, TVS/TS e $\text{COD}_{\text{VFA}}/\text{COD}_{\text{SOL}}$ indicano, rispettivamente, il tempo di

residenza idraulico, il rapporto tra i solidi volatili e quelli totali, ed il rapporto tra acidi grassi volatili e carbonio solubile, entrambi espressi come domanda chimica di ossigeno.

| Parole guida | Parametri | | | | | | |
|---|--------------------------------|-------------|-----------|-----|--------|--|--|
| | Portata della miscela reagente | Temperatura | Pressione | HRT | TVS/TS | COD _{VFA} /COD _{SOL} | Composizione della miscela fermentata (fase gassosa) |
| maggiore | X | X | X | X | X | X | |
| nessun/minore | X | X | X | X | X | X | |
| inversa | X | | | | | | |
| maggiore concentrazione di CO ₂ | | | | | | | X |
| minore concentrazione di CO ₂ | | | | | | | X |
| maggiore concentrazione di CH ₄ | | | | | | | X |
| minore concentrazione di CH ₄ | | | | | | | X |
| maggiore concentrazione di H ₂ | | | | | | | X |
| minore concentrazione di H ₂ | | | | | | | X |
| maggiore concentrazione di H ₂ S | | | | | | | X |
| minore concentrazione di H ₂ S | | | | | | | X |
| maggiore concentrazione di VFA | | | | | | | X |
| minore concentrazione di VFA | | | | | | | X |

Tabella 4. Matrice delle deviazioni rilevanti (fermentatore)

Considerando il fatto che la fermentazione acidogenica genera gas infiammabili (H₂, CH₄ ed H₂S), la cui concentrazione volumetrica viene attualmente misurata mediante analisi gascromatografiche, durante l'applicazione della metodologia Hazop è stata evidenziata, nelle azioni proposte al fine di incrementare il livello di sicurezza dell'impianto su scala industriale, sia la necessità di utilizzare rilevatori di gas che di ridondare tali sensori per garantire un monitoraggio continuo anche in presenza di eventuali guasti. Tra gli interventi proposti per evitare il discostamento dei parametri operativi del fermentatore dalle condizioni ottimali, individuate per massimizzare la produzione di VFA, fondamentale per incrementare la resa di PHA, vanno annoverati l'impiego di specifici sensori per il monitoraggio di grandezze, quali la portata dei reagenti, la temperatura (T) e la pressione di esercizio del reattore, e la loro ridondanza. Ciò consente un controllo più stringente e puntuale del processo e quindi anche un conseguente miglioramento della sua efficienza e sicurezza. Infatti, il flusso massico di Forsu e fanghi e la temperatura influenzano fortemente la concentrazione dei gas prodotti dalla fermentazione. Nelle prove sperimentali, condotte sull'impianto

pilota, è stata riscontrata, nella miscela gassosa prodotta, una concentrazione di CO₂ (gas inerte) sempre superiore all'80% e ciò rende la fermentazione meno pericolosa, in quanto si verifica un incremento del limite inferiore di infiammabilità (LFL) della miscela. Un'altra misura individuata dall'analisi Hazop, per rendere più sicuro l'esercizio del reattore di fermentazione, consiste nella sostituzione della guardia idraulica con valvole di sicurezza, le quali consentono di ridurre in tempi molto più brevi la sovrappressione.

| Nodo esaminato: reattore di fermentazione | | | | |
|---|--|---|---|--|
| deviazione | causa | conseguenza | Contromisure esistenti | Contromisure proposte |
| Portata della miscela dei reagenti | | | | |
| Maggiore | -guasto della valvola IE1 -guasto della pompa E7 | - decremento di HRT | - ispezione visiva -manutenzione periodica di IE1 e E7 (controllo del sistema di tenuta della pompa) - controllo delle impostazioni di IE1 e E7 | -Installare un trasmettitore di livello (LT/LIC) - ridondanza dei trasmettitori |
| Nessuna/minore | -guasto della valvola IE1 -guasto della pompa E7 | - incremento di HRT | - stesse indicazioni della casella sovrastante | - stesse indicazioni della casella sovrastante |
| Inversa | -guasto della valvola IE1 -guasto della pompa E7 -mancanza della valvola di non ritorno | -riduzione della portata in ingresso al fermentatore -danni a IE1 e E7 | | - installare una valvola di non ritorno in uscita dalla pompa per garantire flusso unidirezionale |
| Temperatura (fermentazione mesofila) | | | | |
| Minore (T<37°C) | - riduzione della portata di acqua circolante in camicia (guasto della pompa E9 o della valvola IE5) -decremento della T dell'acqua | -riduzione della concentrazione e dei VFA | - ispezione visiva -manutenzione periodica di IE5 e E9 -manutenzione periodica dell'agitatore del fermentatore | -installare un trasmettitore di temperatura (TT/TIC) - ridondanza dei trasmettitori -motore dell'agitatore |

| | | | | |
|----------------------------------|---|--|--|---|
| | <p>circolante in camicia (guasto della caldaia);</p> <ul style="list-style-type: none"> - guasto del sensore di T <p>-ridotta agitazione della miscela (guasto all'agitatore)</p> | | | <p>dotato di alimentazione elettrica preferenziale</p> |
| <p>Maggiore (T > 37°C)</p> | <ul style="list-style-type: none"> - aumento della portata di acqua circolante in camicia (guasto della pompa E9 o della valvola IE5) -incremento della T dell'acqua circolante in camicia (guasto della caldaia); - guasto del sensore di T | <ul style="list-style-type: none"> -alterazione incontrollabile della concentrazione e dei VFA (ipertermofilia) - ridotta sostenibilità economica del processo -decremento del LFL della miscela -aumento della concentrazione e di H₂ | <ul style="list-style-type: none"> - ispezione visiva -manutenzione periodica di IE5 e E9 -manutenzione periodica dell'agitatore del fermentatore | <ul style="list-style-type: none"> -installare un trasmettitore di temperatura (TT/TIC) - ridondanza dei trasmettitori -monitoraggio delle concentrazioni dei gas infiammabili |
| Pressione | | | | |
| <p>Minore (p < 20 mbar)</p> | <ul style="list-style-type: none"> -variazione della composizione della miscela in ingresso -variazione della T | <ul style="list-style-type: none"> -possibile formazione di un'atmosfera esplosiva (l'assenza di sovrappression e potrebbe consentire l'ingresso di O₂ nel reattore) | <ul style="list-style-type: none"> - controllo della concentrazione della miscela gassosa | <ul style="list-style-type: none"> -installare un trasmettitore di pressione (impostare le soglie di allarme); - ridondanza dei trasmettitori |
| <p>Maggiore (p > 20 mbar)</p> | <ul style="list-style-type: none"> - occlusione della linea di | | <ul style="list-style-type: none"> - guardia idraulica - controllo della concentrazione | <ul style="list-style-type: none"> -installare un trasmettitore di pressione |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | evacuazione del gas | | della miscela gassosa | (impostare delle soglie di allarme); - ridondanza dei trasmettitori; - installare valvole di sicurezza (VS); - ridondanza delle VS |
| HRT (tempo di residenza del substrato) | | | | |
| Minore (<5,5 giorni) | -guasto di E7 -guasto di IE1 | - inibizione del processo di fermentazione; - alterazione della composizione della miscela -riduzione della concentrazione e di VFA | - controllo periodico e manutenzione dei timer che regolano l'esercizio della pompa | - installare un DCS per regolare in modo automatico l'accensione e lo spegnimento della pompa e il grado di apertura della valvola (trasmettitore di livello) |
| Maggiore (> 5,5 giorni) | -guasto di E7 -guasto di IE1 -guasto del timer della pompa E7 | - alterazione della composizione della miscela | | -stesse indicazioni della casella sovrastante |
| TVS/TS | | | | |
| Minore (< 82%) | - variazione della composizione della miscela entrante nel fermentatore | - riduzione della produzione di VFA - minore resa di PHA | | - installare un pH-metro; - ridondanza dei pH-metri |
| Maggiore (> 82%) | - variazione della composizione della miscela entrante nel fermentatore | - incontrollata variazione della composizione della miscela dovuta al decremento | | - installare un pH-metro; - ridondanza dei pH-metri - installare un serbatoio di stoccaggio ed |

| | | | | |
|---|--|---|--|---|
| | | del pH e ad un eccesso della concentrazion e di TVS con possibile incremento della produzione di VFA | | una pompa dedicata per regolare il pH ¹ |
| COD_{VFA}/COD_{SOL} | | | | |
| Minore (<100%) | -composizione chimica della matrice - alto contenuto di proteine nella miscela Forsu/fanghi | - incompleta fermentazione - decremento nella produzione di VFA (minore resa di PHA) -eccessiva produzione di acido lattico, etanolo e altri substrati organici | | -misura periodica del COD solubile; -misura periodica dei VFA |
| Maggiore (>100%) | - condizione non ammissibile | | | |
| Composizione della miscela fermentata (fase gassosa) | | | | |
| Maggiore concentrazione di CO ₂ | - T di esercizio; - percentuale di Forsu e fanghi nella miscela. | - incremento del LFL (esercizio più sicuro del fermentatore) | | - installare sensori per misurare la concentrazione dei gas; -ridondanza dei sensori; - impostare le soglie di allarme basso ed alto (limiti di infiammabilità) |

¹ Il pH può essere regolato attraverso l'alimentazione di reagenti o del digestato anaerobico, che consentono di controllare l'alcalinità

| | | | | |
|--|--|---|--|--|
| Minore concentrazione di CO ₂ | - T di esercizio; - percentuale di Forsu e fanghi nella miscela | - decremento del LFL (esercizio meno sicuro del fermentatore) | | - stesse indicazioni della casella sovrastante |
| Maggiore concentrazione di CH ₄ | - T di esercizio; - percentuale di Forsu e fanghi nella miscela | - incremento del LFL | | - stesse indicazioni della casella sovrastante |
| Minore concentrazione di CH ₄ | - T di esercizio; - percentuale di Forsu e fanghi nella miscela | - decremento del LFL | | - stesse indicazioni della casella sovrastante |
| Maggiore concentrazione di H ₂ | - T di esercizio; - percentuale di Forsu e fanghi nella miscela | - decremento del LFL | | - stesse indicazioni della casella sovrastante |
| Minore concentrazione di H ₂ | - T di esercizio; - percentuale di Forsu e fanghi nella miscela | - incremento del LFL | | - stesse indicazioni della casella sovrastante |
| Maggiore concentrazione di H ₂ S ² | -T di esercizio; - percentuale di Forsu e fanghi nella miscela | - maggiore pericolosità dovuta alla tossicità del gas | | - stesse indicazioni della casella sovrastante |
| Minore concentrazione di H ₂ S | - T di esercizio; - percentuale di Forsu e fanghi nella miscela | - minore pericolosità | | - stesse indicazioni della casella sovrastante |

Tabella 5. Risultati dell'analisi Hazop

Gli interventi, caratterizzati dall'introduzione di un'apposita sensoristica e delle relative soglie di allarme per il controllo dei parametri di funzionamento del fermentatore, sono riportati in figura 3, che rappresenta il P&ID (disegnato con il software M4 P&ID FX), il quale costituisce lo step preliminare per la progettazione del reattore su scala reale.

² Il gas è presente in concentrazioni estremamente basse (inferiori a 0,4% v/v).

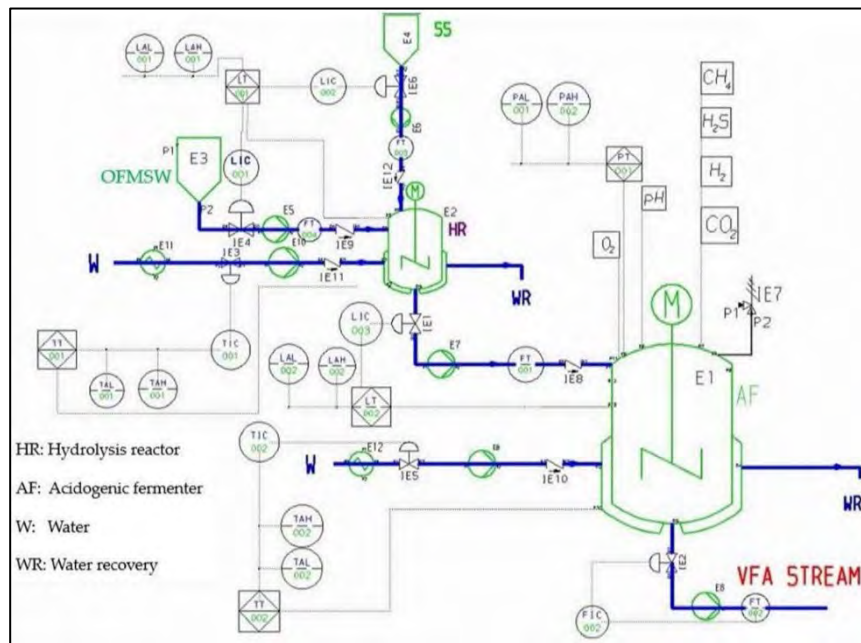


Figura 3. P&ID

5. Conclusioni

Rispetto ai processi chimici tradizionali, nel settore dei bioprocessi, come quello relativo alla produzione di PHA da Forsu, ad oggi si registrano pochi studi focalizzati sugli aspetti di salute e sicurezza. L'Hazop è uno strumento molto utile per migliorare la sicurezza e l'efficienza dei processi industriali, poiché consente di individuare specifici interventi correttivi, in grado di evitare o limitare le deviazioni dei parametri operativi dalle intenzioni di progetto e, quindi, di ridurre le possibili conseguenze. Tali deviazioni potrebbero generare scenari (rilasci di composti tossici o infiammabili, esposizione ad agenti biologici, etc.) potenzialmente pericolosi per la salute e sicurezza dei lavoratori e pertanto, in molti casi, si rende necessario implementare le misure di prevenzione e protezione. Se applicata alla fase della progettazione preliminare di un impianto o della transizione da impianto pilota a impianto full-scale, la metodologia Hazop consente di effettuare un'analisi estremamente dettagliata del processo produttivo in esame, permettendo di acquisirne una profonda conoscenza, indispensabile per l'individuazione dei pericoli e per la mitigazione dei rischi.

Bibliografia

- [1] Nguemna Tayou L, Lauri R, Incocciati E, Pietrangeli B, Majone M, Micolucci F, Gottardo M, Valentino F. Acidogenic fermentation of food waste and sewage sludge mixture: effect of operating parameters on process performance and safety aspects. *Proc. Safety and Environ. Prot.* 2022; 163: 158-166.
- [2] Valentino F, Moretto G, Lorini L, Bolzonella D, Pavan P, Majone M. Pilot-Scale polyhydroxyalkanoate production from combined treatment of organic fraction of

municipal solid waste and sewage sludge. *Ind. and Eng. Chem. Res.* 2019; 58: 12149–12158.

[3] Lauri R, Incocciati E, Pietrangeli B, Nguemna L, Valentino F, Gottardo M, Majone M. Hazop analysis of a bioprocess for polyhydroxyalkanoate (PHA) production from organic waste: Part A. *Ferment.* 2023; 9: 99-112.

[4] Disponibile su: <https://www.marketsandmarkets.com/PressReleases/pha.asp>.

[5] Dunj3 J, Fthenakis V, V3lchez J A, Arnaldos J. Hazard and operability (HAZOP) analysis. A literature review. *Journ. of Haz. Mat.* 2010;173: 19-32.

[6] Angel M, Herrera D O, Severino A, Carlos A, Monte E, Lemes B. A structural approach to the Hazard and operability technique in the biopharmaceutical industry. *Journ. of Loss Prev. in the Proc. Ind.* 2015; 35: 1–11.

[7] Pietrangeli B, Lauri R, Davolos D, Incocciati E, Lorini L, Villano M, Martinelli A, Palocci C, Petrangeli Papini M, Amanat N, Chronopoulou L, Alfano S, Valentino F, Pavan P, Moretto G, Bolzonella D, Rossetti S, Crognale S, Carfagnini A, Majone M. Salute e sicurezza nelle biotecnologie industriali. Inail Pubblicazioni ISBN 978-88-7484-753-2. Milano, 2022, pp. 10-11.

Concentrazione di idrogeno in ambiente chiuso

F. Pera, A. Pireddu, G. L. Amicucci, E. Del Prete

Inail - Dit

Abstract

L'idrogeno è utilizzato per diverse applicazioni ed è presente in ambito industriale sia come prodotto finale, sia come sottoprodotto di processi tecnologici.

È altamente infiammabile e può formare atmosfere potenzialmente esplosive, se miscelato all'aria, quando la sua concentrazione è compresa tra il limite inferiore (LEL) e quello superiore (UEL) di esplosività. La piccolissima densità tende a farlo salire velocemente, mentre il grande coefficiente di diffusione tende a farlo allontanare dal punto di emissione.

A seconda delle condizioni in cui avviene l'emissione, la miscela può accumularsi all'interno di ambienti confinati, di involucri (es. vano per l'alloggio della batteria in un'apparecchiatura), sotto le coperture degli edifici, oppure in prossimità di ostacoli che ne favoriscano il ristagno, mentre all'aperto tende facilmente a disperdersi.

In questo articolo illustreremo gli esperimenti condotti nella sede INAIL di Monteporzio Catone al fine di caratterizzare il comportamento dell'idrogeno molecolare in fase di accumulo sotto una cappa chiusa posta all'interno di un locale adibito ad attività tipiche di un'officina meccanica, assimilabili a quelle di un ambiente industriale.

Keywords: atmosfere esplosive, individuazione e classificazione delle zone pericolose, valutazione del rischio.

1. Introduzione

Nei prossimi decenni, la quota di fonti di energia rinnovabili nel mix energetico globale dovrebbe aumentare in modo significativo, con una crescente domanda di vettori energetici privi di carbonio, come l'idrogeno e combustibili a base di idrogeno (IEA, 2019). Tuttavia, gravi incidenti possono avere implicazioni significative per lo sviluppo e la diffusione delle tecnologie emergenti dell'idrogeno ([1] e [2]). La grande reattività e la piccola energia di accensione delle miscele idrogeno-aria, nonché la propensione a subire la transizione da deflagrazione a detonazione (DDT), implicano che non è semplice da raggiungere e documentare lo stesso livello di sicurezza per sistemi a idrogeno, rispetto a sistemi simili basati su carburanti come benzina, diesel e gas naturale [3].

Sono stati condotti molti studi finalizzati alla comprensione delle conseguenze di eventi di innesco che potrebbero verificarsi quale risultato dell'uso dell'idrogeno in alternativa ai combustibili fossili o in siti industriali, ad esempio [4]. Tuttavia, è stata

prestata poca attenzione all'effetto dell'esplosione in operazioni "su piccola scala" cioè nello svolgimento di lavori che comportino la movimentazione manuale e la manipolazione di imballaggi o nei casi di imbarcazioni contenenti tale gas nella stiva. Ingram et al. [5] hanno affrontato il divario di conoscenze in questo ambito, attraverso un programma sperimentale condotto per simulare l'effetto sulla sicurezza delle persone in presenza esplosioni di idrogeno localizzate e deboli, limitate a piccoli volumi.

Rigas e Sklavounos [6] hanno valutato i pericoli più comuni associati a impianti di stoccaggio e sistemi di distribuzione dell'idrogeno. Gli autori hanno dimostrato, attraverso la loro analisi dei rischi, che l'accensione dell'idrogeno può sfociare in incidenti che rappresentano una grave minaccia per i beni e la sicurezza delle persone. Gli stessi autori hanno anche osservato che la nube derivante dalla fuoriuscita di idrogeno liquefatto si comporta come un gas pesante, che rimane a basse altezze dal suolo, con concentrazioni comprese nell'intervallo di infiammabilità.

Hajji et al. [7] hanno esaminato l'influenza della conformazione geometrica di un angolo al vertice di una copertura sulla dispersione dell'idrogeno a seguito di un'emissione. Schiavetti et al. [8] hanno invece condotto uno studio sperimentale di deflagrazioni di idrogeno con accensione interna ed esterna al volume ventilato.

A seconda delle diverse condizioni in cui avviene l'emissione, il gas può accumularsi più o meno rapidamente all'interno di ambienti ristretti, di involucri (es. vano per l'alloggio della batteria in un carrello elevatore), sotto le coperture degli edifici oppure in prossimità di strutture od ostacoli che si comportino come trappole e ne favoriscano il ristagno e la raccolta, mentre all'aperto esso tende facilmente a disperdersi [9].

Negli ambienti in cui è possibile la formazione di miscele aria-idrogeno, acquista particolare importanza l'individuazione e la classificazione delle zone pericolose. È altresì importante caratterizzare il comportamento dell'idrogeno, valutare la diffusione della miscela aria-idrogeno nel tempo e individuare le condizioni che ne favoriscano l'accumulo fino al raggiungimento di concentrazioni pericolose.

Il presente lavoro analizza gli esiti di esperimenti eseguiti con l'uso di sensori comunemente impiegati nell'industria, basati sulla simulazione di un'emissione subsonica di idrogeno in ambiente chiuso. Tali esperimenti fanno parte di una serie di prove condotte nella sede INAIL di Monteporzio Catone con lo scopo di caratterizzare il comportamento dell'idrogeno miscelato in aria in ambienti chiusi (persistenza nel tempo della miscela aria-idrogeno) e di verificare le condizioni che ne favoriscano l'accumulo in presenza di strutture dove la miscela aria-idrogeno possa rimanere intrappolata fino al raggiungimento di concentrazioni pericolose. Tali esperimenti sono descritti nel volume "Misure di concentrazione in ambiente chiuso" [9] al quale si rimanda per ogni dettaglio.

Nell'articolo sono considerate soltanto le risultanze delle ultime due prove eseguite (12 e 13) per osservare il comportamento della miscela aria-idrogeno in fase di

accumulo in una struttura catturante a tal scopo predisposta e costituita, come già accennato, da una cappa chiusa. Le prove precedenti a quelle qui considerate possono essere ritenute ad esse propedeutiche in quanto hanno fornito le indicazioni necessarie per definire le modalità di esecuzione degli esperimenti [9].

Oltre a considerare la fenomenologia dell'accumulo in fase di emissione, è stata anche considerata la fase di riduzione della concentrazione e di persistenza dell'atmosfera esplosiva al cessare dell'emissione. Tale fase di riduzione della concentrazione ha permesso di calcolare le costanti di tempo utili a determinare il ritorno a concentrazioni non pericolose di idrogeno. Nel presente lavoro sono stati rielaborati i dati presenti in [9] con ulteriori considerazioni qualitative e quantitative in merito all'andamento temporale della riduzione della concentrazione di atmosfera esplosiva al cessare dell'emissione.

In particolare, il presente studio contiene anche le seguenti sezioni: 2. *Materiali e metodi*, contenente una breve sintesi della metodologia di prova; 3. *Risultati*, dove sono descritti e rappresentati gli esiti dell'analisi; 4. *Discussione e conclusioni*, che include un esame dei risultati ottenuti e le conclusioni; 5. *Sviluppi futuri del lavoro*.

2. Materiali e metodi

Le prove in esame (12 e 13 descritte nel volume [9]) sono state condotte con rivelatori di concentrazione di gas idrogeno di tipo pellistor (sensori) in ambiente chiuso e in presenza di una cappa sovrastante la sorgente di emissione. I sensori emettono un segnale in corrente che varia da 4 a 20 mA che corrispondono a un intervallo che va da 0 a 4% in volume di H₂ in aria ovvero da 0 a 100% del LEL di H₂ in aria.

I regimi di portata considerati sono riportati in Tabella 1.

Entrambe le prove sono state eseguite con la superficie superiore interna della cappa a una distanza di 1,2 m dalla sorgente posizionata in corrispondenza della proiezione del centro geometrico della cappa verso il suolo. Tale posizione è stata suggerita dalle precedenti sperimentazioni propedeutiche (prove 1-11) nelle quali si è verificato che gli accumuli nella cappa per distanze maggiori risultavano di scarso o trascurabile interesse ai fini della ricerca.

| Prova | Portata (l/min) | Durata (min) | Portata (l/min) | Durata (min) |
|-------|-----------------|--------------|-----------------|--------------|
| 12 | 3 | 30 | 0 | 30 |
| 13 | 5 | 30 | 0 | 30 |

Tabella 1. Regimi di portata per le prove 12 e 13

Il gas idrogeno utilizzato è contenuto in una bombola; le portate sono state impostate tramite valvola e flussimetro con diametro del tubo di emissione pari a 14,5 mm.

Poiché la velocità dell'aria influenza notevolmente il valore della diluizione dell'idrogeno, tale valore è stato misurato con l'ausilio sia di un anemometro a filo caldo (particolarmente indicato in ambienti chiusi), sia di un anemometro a ventolino (più adatto in ambienti aperti).

Inoltre, sono stati utilizzati: un sistema di acquisizione dati a grande velocità ad 8 canali con funzioni di trigger e pre-trigger, un box alimentatore/condizionatore per trasduttori con uscita in corrente e una bombola di idrogeno da 14 litri con una pressione di 200 *ata* dotata di valvola di riduzione alta-bassa pressione a doppio stadio con valvola anti-ritorno di fiamma.

Le prove sono state eseguite alle seguenti condizioni:

Temperatura $T = 13^{\circ}\text{C}$

Velocità dell'aria $v_a = 0,1 \text{ m/s}$

Portata $Q = 3 - 5 \text{ l/min}$

Posizione dei sensori (Tabella 2):

- origine del sistema di riferimento: sorgente di idrogeno;
- asse x: orizzontale con orientamento verso destra;
- asse y: verticale con orientamento verso l'alto;
- asse z: perpendicolare al piano visualizzato con orientamento uscente.

La rilevazione della concentrazione di idrogeno in ciascuno dei sei sensori è avvenuta sia durante la fase di emissione (primi 30 minuti della prova) che dopo la chiusura del flusso di idrogeno (rimanenti 30 minuti della prova).

3. Risultati

Di seguito sono riportati gli andamenti temporali delle concentrazioni percentuali (da 0% a 4%) di idrogeno in aria in volume, rilevati nelle due prove 12 e 13. Nelle figure 1a sono riportate le concentrazioni rilevate dai sensori posizionati a quota 1,2 m dalla sorgente di emissione (sensori 4 e 5), nelle figure 1b sono riportate le concentrazioni rilevate dai sensori posizionati a quota 1,0 m dalla sorgente (sensori 1, 2, 3) e nella figura 1c sono riportate le concentrazioni rilevate dal sensore posizionato a quota 0,8 m dalla sorgente (sensore 6).

| n. prova | 12 Q = 3 l/min | | | 13 Q = 5 l/min | | |
|-----------|-------------------|-------|-------|-------------------|-------|-------|
| | x [m] | y [m] | z [m] | x [m] | y [m] | z [m] |
| Sensore 1 | -0,50 | 1,00 | 0,00 | -0,50 | 1,00 | 0,00 |
| Sensore 2 | 0,00 | 1,00 | 0,00 | 0,00 | 1,00 | 0,00 |
| Sensore 3 | 0,50 | 1,00 | 0,00 | 0,50 | 1,00 | 0,00 |
| Sensore 4 | -0,25 | 1,20 | 0,00 | -0,25 | 1,20 | 0,00 |
| Sensore 5 | 0,25 | 1,20 | 0,00 | 0,25 | 1,20 | 0,00 |
| Sensore 6 | 0,00 | 0,80 | 0,00 | 0,00 | 0,80 | 0,00 |

Tabella 2. Configurazione dei sensori per le prove 12 e 13 e disposizione dei sensori all'interno della cappa rispetto alla sorgente di emissione.



Figura 1a: Andamenti temporali delle concentrazioni rilevate nelle prove 12 e 13 (disposizione sottocappa dei sensori 4 e 5 a 1,2 m dalla sorgente di emissione)



Figura 1b: Andamenti temporali delle concentrazioni rilevati nelle prove 12 e 13 (disposizione sottocappa dei sensori 1, 2, 3 a 1,0 m dalla sorgente di emissione)

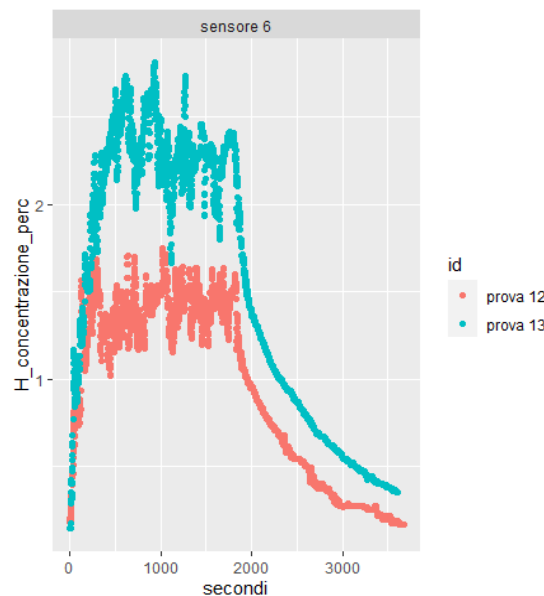


Figura 1c: Andamenti temporali delle concentrazioni rilevati nelle prove 12 e 13 (disposizione sottocappa del sensore 6 a 0,8 m dalla sorgente di emissione)

Oltre a rappresentare graficamente gli andamenti temporali, si riportano le costanti di tempo τ stimate durante la fase di decadimento della concentrazione. Per il calcolo di queste costanti è stato adottato il modello esponenziale a parametro negativo riportato di seguito:

$$y = \%_{H_2}(t) = Ae^{-\frac{t}{\tau}} \quad (1)$$

Per la stima dei parametri è stato utilizzato il modello lineare che si ottiene passando ad ordinate logaritmiche:

$$\log(y) = \log(\%_{H_2}(t)) = \log(A) + \log\left(e^{-\frac{t}{\tau}}\right) = \log(A) - \frac{t}{\tau} \quad (2)$$

I parametri τ e $\log(A)$ per ciascun sensore sono stati ottenuti stimando la retta di regressione per le coppie di dati $(t; \log(y))$ del modello sopracitato [per semplicità e perché ininfluente ai fini degli obiettivi delle prove, $\log(A)$ non è stato riportato di seguito]. L'intervallo di dati considerato varia dall'istante 2200 s fino all'istante 3200 s, come riportato nelle tabelle 3 e 4. Tale intervallo è stato scelto per considerare momenti sufficientemente distanti sia dall'inizio del decadimento della concentrazione sia dalla fine dell'esperimento in modo da eliminare effetti di bordo che possano incidere sulla stima dei parametri del modello.

Per il calcolo dell'errore sulla costante di tempo, è stato propagato l'errore ottenuto dalla regressione del modello lineare. Il coefficiente angolare m della retta di regressione è legato alla costante di tempo dalla relazione:

$$\tau = \frac{1}{|m|} \quad (3)$$

e quindi:

$$\Delta\tau \leq \frac{1}{m^2} \Delta m \quad (4)$$

Gli errori assoluti riportati nelle tabelle 3 e 4 sono stati ottenuti dai valori di $\Delta\tau$ dopo essere stati maggiorati di un fattore 3 (con un procedimento simile a quello seguito quando si adotta per l'incertezza il valore di $\pm 3\sigma$, tre volte la deviazione standard). Sono stati ottenuti i seguenti risultati per le costanti di tempo con un'ottima corrispondenza tra modello e misure sperimentali, come si può notare dai valori del coefficiente di determinazione R^2 riportati:

| Sensore | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| τ (s) | 2084 ± 10 | 1772 ± 10 | 1978 ± 10 | 1769 ± 10 | 1788 ± 20 | 1989 ± 30 |
| R^2 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,97 |
| Intervallo (s) | 2200-3200 | 2200-3200 | 2200-3200 | 2200-3200 | 2200-3200 | 2200-3200 |

Tabella 3. Costanti di tempo per la prova 12

| Sensore | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| τ (s) | 2612 ± 6 | 2279 ± 5 | 2477 ± 5 | 2329 ± 4 | 2328 ± 4 | 2637 ± 10 |
| R^2 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 |
| Intervallo (s) | 2200-3200 | 2200-3200 | 2200-3200 | 2200-3200 | 2200-3200 | 2200-3200 |

Tabella 4. Costanti di tempo per la prova 13

4. Discussione e conclusioni

In tutti i grafici di entrambe le prove è possibile rilevare una rapida salita della concentrazione fino a un quasi plateau, a cui fa seguito una lenta diminuzione della concentrazione di idrogeno dopo la cessazione dell'emissione.

I valori massimi di concentrazione raggiunti durante la fase di emissione dipendono dalle portate di emissione e dalla quota dei sensori all'interno della cappa. Per la portata di 5 l/min (prova 13) i sensori 4 e 5 raggiungono concentrazioni massime comprese tra l'80 e il 100% del LEL in circa 600 s che persistono per circa 500 s, mentre concentrazioni tra il 60 e l'80% del LEL persistono fino a circa 1800 s nei sensori da 1 a 5 e per 500 s nel sensore 6. Nel caso della portata pari a 3 l/min (prova 12) le concentrazioni raggiungono il 60-80% del LEL dopo 1600 s dall'inizio dell'emissione interessando i sensori 4 e 5 per una durata di circa 15 s.

Come si può notare dai grafici, tra tutti i sensori il numero 6 è stato quello più perturbato, si trovava infatti quasi al livello del bordo inferiore della cappa e, pertanto, era più esposto a possibili correnti d'aria presenti nel locale. Inoltre, si osserva che i grafici della prova 13 sono meno perturbati di quelli della prova 12. Gli autori ipotizzano che a maggiori portate corrisponda una maggiore velocità di rimescolamento e quindi il raggiungimento di concentrazioni stabili in minor tempo. Quando l'emissione viene interrotta, in tutta la cappa si stabilisce un processo di decadimento della concentrazione con andamento caratterizzato da un'opportuna costante di tempo.

All'interno della cappa la concentrazione più elevata (sensori 4 e 5) è stata misurata immediatamente sotto la copertura (1,2 m dalla sorgente di emissione) e diminuisce rapidamente al di sotto di questa zona, come si nota dagli andamenti temporali della concentrazione misurati dai sensori 1, 2, 3 e 6 rispetto ai sensori 4 e 5 di entrambe le prove.

Ciò è naturale, in quanto, nelle prove eseguite, la tendenza naturale dell'idrogeno a salire verso l'alto è stata ostacolata dalla barriera fisica, rappresentata dal tetto della cappa, dove si è formata una zona di accumulo di gas. Questo spiega perché i sensori 4 e 5 più prossimi alla zona di accumulo, hanno registrato i picchi più elevati, mentre i sensori 1, 2 e 3 e ancora di più il sensore 6, posizionati a quote più basse e distanti dalla zona di accumulo, concentrazioni meno elevate.

Le prove svolte hanno permesso di analizzare il fenomeno della diffusione dell'idrogeno in un ambiente chiuso, libero da ostacoli, nonché di valutare le modalità di accumulo del gas all'interno di una cappa. Inoltre, con riferimento alla fase di decadimento, sono state calcolate le costanti di tempo utili a determinare il modello di ritorno a concentrazioni non pericolose di idrogeno.

Le prove che hanno preceduto quelle considerate (prove 1-11 per le quali si rimanda a [9]) hanno mostrato una grande varietà di comportamenti tra i diversi sensori. Questa varietà di comportamenti è dovuta, molto probabilmente, alla grande motilità dell'idrogeno molecolare, molto più leggero dell'aria, insieme alla presenza di perturbazioni di tipo sistematico quali, ad esempio, movimenti casuali dell'aria circostante. L'indizio che sia questo il motivo è suggerito dagli andamenti temporali delle concentrazioni misurate dai sensori 4 e 5, situati in una posizione "protetta" rispetto agli altri. Infatti, in ciascuna delle due prove 12 e 13 le concentrazioni del sensore 4 sono quasi sovrapponibili con quelle del sensore 5.

Nonostante i limiti della sperimentazione, le prove eseguite hanno fornito elementi significativi per la caratterizzazione del comportamento dell'idrogeno molecolare in ambienti simili ad ambienti di lavoro.

Alla luce dei risultati ottenuti si può ritenere che, anche in situazioni reali e non solo sperimentali, immediatamente al di sotto di un ostacolo fisico che si opponga al moto naturale dell'idrogeno, possano osservarsi concentrazioni elevate, prossime al LEL e pertanto pericolose per la sicurezza.

5. Sviluppi futuri del lavoro

Le prove eseguite hanno mostrato una dipendenza non trascurabile dalla temperatura e dai movimenti dell'aria nell'ambiente in cui è posizionata la sorgente di emissione. La stessa portata di emissione, al suo crescere, può aumentare la turbolenza dell'aria.

Per ridurre queste influenze al minimo si sarebbe dovuto approntare l'apparato sperimentale all'interno di una camera chiusa sufficientemente isolata dai disturbi esterni con al massimo delle aperture verso l'alto.

Infatti, le influenze ambientali possono essere ridotte o annullate in apparati sperimentali realizzati con complessità e isolamento maggiori, che tuttavia risultano poco idonei a riprodurre attività "su piccola scala", tipiche degli ambienti di lavoro delle piccole e medie imprese che operano con l'idrogeno, obiettivo invece raggiunto dal presente studio.

6. Bibliografia

[1] Angers, B., Hourry, A., Bénard, P., Tessier, P., Perrin, J. Simulations of hydrogen releases from high pressure storage systems, WHEC 16, 13-16 June, 2006 Lyon France.

[2] BRHS Biennial Report on Hydrogen Safety. Chapter 3 Accidental phenomena and consequences. HySafe June 2007.

[3] Wingerden, v., Matthijs, Skjold, T., Roosendans, D., Dutertre, A., Pekalski, A. Chemical inhibition of hydrogen-air explosions: Literature review, simulations and experiments. Process Safety and Environmental Protection. Vol. 176, 2023, Pages 1120-1129. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2023.03.042>.

[4] Agranat, V. M., Tchouvelev, A. V., Cheng, Z., et al. CFD modeling of gas release and dispersion: prediction of flammable gas clouds. 2007. Mississauga, Ontario, Canada. DOI:10.1007/978-1-4020-6515-6_14.

[5] Ingram, J.M., Averill, A.F., Gomez-Agustina, L., Holborn, P.G., Battersby, P., Benson, C.M., Potential hazard consequences to personnel exposed to the ignition of small volumes of weakly confined stoichiometric hydrogen/air mixture. International Journal of Hydrogen Energy. Vol. 43, Issue 50, 13 (2018), Pages 33-45. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.10.092>.

[6] Rigas F., Sklavounos S. Evaluation of hazards associated with hydrogen storage facilities. Vol.30, Iss. 13-14, 2005, Pag. 1501-1510. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2005.06.004>.

[7] Hajji, Y., Bouteraa, M., Cafsi, A. E., Belghith, A., Bournot, P., Kallel, F. Dispersion and behavior of hydrogen during a leak in a prismatic cavity (2014) International Journal of Hydrogen Energy, 39 (11), pp. 6111-6119. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2014.01.159.

[8] Schiavetti, M., Marangon A., Carcassi, M. Experimental study of vented hydrogen deflagration with ignition inside and outside the vented volume (2014). Int. Journal of Hydrogen Energy, 39 (35), pp. 20455-20461. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.04.006>.

[9] Pera, F., Pireddu, A. Misure di concentrazione di idrogeno in ambiente chiuso. INAIL 2015. ISBN 978-88-7484-461-6.

Applicazione del metodo HazOp e della tecnica LOPA per l'accettabilità del rischio di processo

D. Sallustio, F. P. Nigri

Inail – Uot di Bari

Abstract

Lo scopo del lavoro è duplice: stimare la frequenza di accadimento di uno scenario incidentale in uno stabilimento a rischio di incidente rilevante e confrontare tale frequenza con quella ritenuta accettabile alla luce del contenuto del D.M. 9 maggio 2001, che detta i requisiti minimi di sicurezza per la pianificazione territoriale di zone interessate dalla presenza di stabilimenti a rischio di incidente rilevante. Per raggiungere l'obiettivo, gli autori utilizzano due metodologie di analisi rischio di processo: il metodo HazOp e la tecnica LOPA (Layers of Protection Analysis).

In un primo momento si adopera il metodo HazOp, dopo aver individuato il nodo (sezione di impianto da attenzionare) e la variabile di processo da prendere in considerazione che, nel caso in esame, è la pressione della fase gas all'interno di un separatore (scrubber) inserito in un impianto destinato all'estrazione di idrocarburi.

In un secondo momento si adopera la tecnica LOPA, interamente mutuata dalla parte terza dell'IEC 61511, standard internazionale che disciplina l'uso dei sistemi di sicurezza nell'industria di processo. La tecnica LOPA ha il pregio di sfruttare l'Albero degli Eventi (Event Tree Analysis) per risalire alla frequenza di accadimento dell'evento incidentale, che si prefigura in seguito all'indesiderato aumento di pressione all'interno del separatore bifasico.

Per la stesura del lavoro gli autori hanno preso spunto da un "caso studio" esaminato nel corso di una recente ispezione collegiale, finalizzata alla validazione del sistema di gestione della sicurezza di uno stabilimento a rischio di incidente rilevante della Basilicata.

Keywords: HazOp (Hazard Operability analysis), LOPA (Layers of Protection Analysis), accettabilità del rischio di processo.

1. Introduzione

In un impianto tecnologico a rischio di incidente rilevante l'applicazione del metodo HazOp consente di risalire, tramite l'utilizzo di opportune "parole guida", alle deviazioni delle variabili di processo dagli intenti di progetto. Nel caso in studio, la "parola guida" utilizzata (more) porta a concentrare l'attenzione su un aumento intempestivo della pressione della "fase gas" all'interno di uno scrubber.

Il metodo HazOp ha, però, un limite: è una tecnica qualitativa di analisi del rischio, che non fornisce alcun valore della frequenza di accadimento dell'evento incidentale

derivante dall'indesiderato aumento di pressione all'interno del separatore. Per questa ragione al metodo HazOp gli autori affiancano la tecnica LOPA che considera l'aumento di pressione, prefigurato dal metodo HazOp, come una causa iniziatrice, e cioè un evento che ha in sé il potenziale di avviare una sequenza incidentale. Scopo della tecnica LOPA è l'interruzione di tale sequenza.

Nella tecnica della sicurezza, interrompere una sequenza incidentale equivale a individuare quel complesso di "barriere" che consente di ridurre la frequenza di accadimento dello scenario incidentale a un valore non superiore a quello ritenuto accettabile dal D.M. 9 maggio 2001. Le "barriere" di cui fa uso la tecnica LOPA sono "misure di prevenzione", e cioè apprestamenti di carattere tecnico e gestionale in grado di ridurre il rischio di impianto facendo leva sulla riduzione della frequenza di accadimento dell'evento indesiderato e non sulla magnitudo.

Poiché le barriere utilizzate dalla tecnica LOPA sono tutt'altro che infallibili, l'IEC 61511 ne elenca con cura le "probabilità di fallimento", meglio note con termine "PFD" che sta per Probability of Failure on Demand.

La PFD di una barriera rappresenta la probabilità che ha una barriera di non eseguire la funzione che gli è stata affidata, in caso di richiesta da parte del processo. La PFD è in stretta correlazione con l'efficacia della barriera, nel senso che quanto più è basso il valore della PFD, tanto maggiore è l'efficacia della barriera in termini di riduzione del rischio di processo.

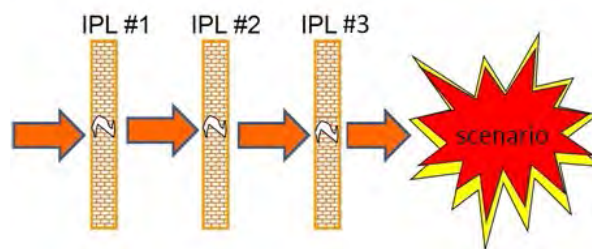


Figura1. Independent Protection Layers (IPL)

2. Il metodo LOPA

Nel metodo LOPA, le barriere sono definite Independent Protection Layers (IPL) per il fatto che il fallimento di una barriera è ritenuto indipendente:

- dall'accadimento dell'evento iniziatore;
- dal fallimento di qualsiasi altra barriera.

Nell'applicazione del metodo LOPA, si individuano cinque step.

1. Descrizione dell'evento iniziatore:

la causa iniziatrice di una sequenza incidentale deve essere definita nel corso dell'analisi HazOp.

2. Stima della frequenza di accadimento dell'evento iniziatore:

la frequenza di accadimento della causa iniziatrice deve essere stimata. Tale operazione è possibile con i dati dell'IEC 61511.

3. Valutazione delle conseguenze e definizione delle salvaguardie:

tutte le conseguenze derivanti dalla causa iniziatrice devono essere valutate. Devono essere definite le salvaguardie e, infine, devono essere stimate le PFD delle singole barriere.

4. Calcolo della frequenza di accadimento dell'evento indesiderato:

la frequenza di accadimento dello scenario può essere calcolata con l'ausilio dell'Event Tree Analysis (ETA).

5. Controllo finale:

la frequenza di accadimento dello scenario deve essere confrontata con la frequenza tollerabile di rischio, mutuata dal D.M. 9 maggio 2001.

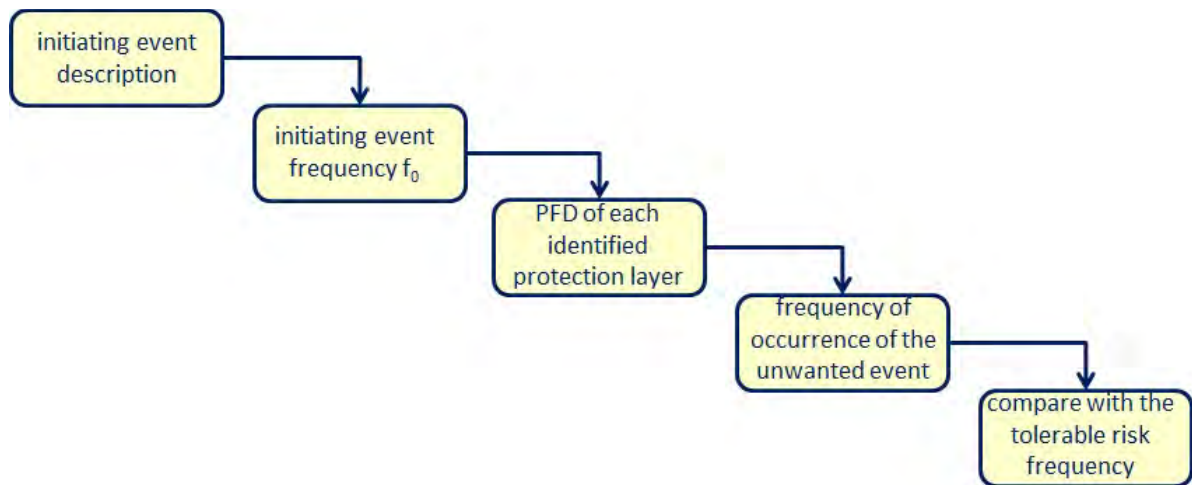


Figura 2. Metodo LOPA in sequenza

Nel prosieguo, per applicare correttamente il metodo LOPA,

- sarà necessario acquisire preventivamente:
 - la frequenza di accadimento dell'evento iniziatore (f_0);
 - la probabilità di fallimento su richiesta di ogni barriera (PFD),
- e successivamente calcolare:
 - la frequenza tollerabile di rischio ($f_{\text{tolerable risk}}$).

L'applicazione del metodo LOPA alla sequenza incidentale consentirà di stimare la frequenza di accadimento dello scenario. A tale frequenza si perviene moltiplicando la frequenza di accadimento dell'evento iniziatore (f_0) per le probabilità di fallimento su richiesta (PFD) delle diverse barriere.

Infine, per stabilire l'accettabilità del rischio di processo nel contesto in esame, la frequenza di accadimento dello scenario sarà confrontata con la frequenza tollerabile di rischio.

3. L'impianto di processo

L'impianto in esame è destinato al trattamento di una miscela bifasica, ricca di idrocarburi, proveniente da un pozzo di estrazione. Nel sottosuolo, la miscela è intrappolata da uno strato argilloso che ne impedisce la risalita. Per raggiungere la

miscela, si rende necessario individuare la "trappola", situata a migliaia di metri sotto la superficie. Quindi, si procede alla perforazione di un pozzo, che raggiunge la profondità di qualche chilometro. Poiché la pressione all'interno del pozzo è elevata, sulla testa del pozzo (well head) è presente una valvola allo scopo di controllare la pressione della miscela. In uscita dal pozzo, la miscela viene convogliata nell'impianto di trattamento.

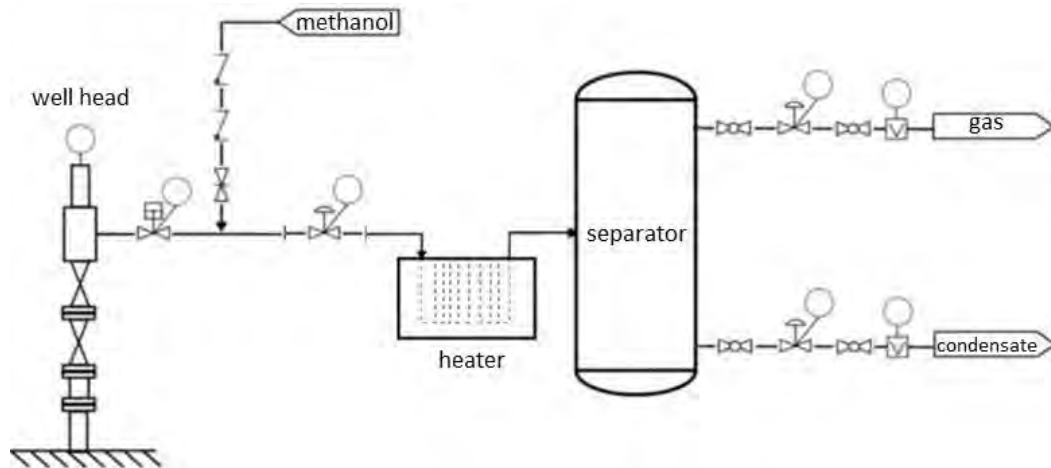


Figura 3. Impianto di processo

Durante i mesi invernali, quando la temperatura scende, l'acqua disciolta nella miscela può congelare. Questo inconveniente determina intasamenti nella tubazione e danneggia i componenti di impianto. Il metanolo funge da inibitore, abbassando il punto di congelamento dell'acqua. L'iniezione di metanolo rappresenta, pertanto, una misura idonea a ridurre il rischio di congelamento dell'acqua disciolta nella miscela.

La miscela contiene anche quantità significative di anidride carbonica (CO₂) e idrogeno solforato (H₂S):

- l'anidride carbonica comporta problemi di corrosione ai componenti di impianto;
- il solfuro di idrogeno è altamente nocivo e deve essere separato dalla miscela al fine di proteggere il personale.

La rimozione di anidride carbonica e solfuro di idrogeno avviene in una "torre di addolcimento" nella quale la miscela viene addizionata di ammine, composti organici a base di azoto. La "torre di addolcimento" è posta a valle di un "separator", che rappresenta il "nodo" sul quale il "team HazOp" intende concentrare la propria attenzione.

4. Il separatore

Nel separatore "V-01" la miscela bifasica, proveniente dal pozzo sotto forma di emulsione, viene sottoposta a un trattamento destinato a separare dalla miscela la fase liquida, meglio nota come "condensato". Il processo di separazione viene condotto in continuo. Il separatore è alimentato dalla miscela bifasica (feed). Il

processo richiede una certa quantità di energia termica, somministrata alla miscela in uno scambiatore di calore (heater) che precede l'ingresso nel separatore.

I prodotti del processo di separazione sono due correnti fluide:

- una liquida, corrispondente al "condensato", che viene drenata attraverso la parte bassa del separatore;
- l'altra gassosa, prelevata dalla parte alta del separatore, convogliata verso la "torre di addolcimento" per l'abbattimento delle concentrazioni di anidride carbonica e idrogeno solforato.

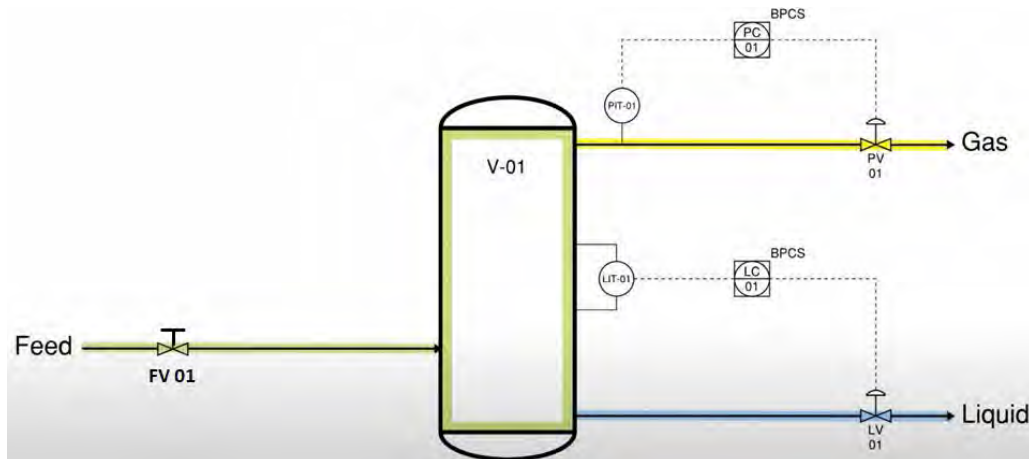


Figura 4. Separatore "V-01"

5. L'analisi HazOp

La variabile di processo che, più di altre, incide il corretto funzionamento del separatore è la pressione della fase gassosa, influenzata dal livello della fase liquida: quanto più il livello della fase liquida aumenta nel separatore, tanto più aumenta la pressione della fase gas. Il team applica alla variabile "pressione della fase gas" un certo numero di "parole guida" per poi investigare se la combinazione "variabile di processo - parola guida" ha in esito una deviazione significativa dalle normali condizioni operative. Tale deviazione corrisponde alla causa iniziatrice di una sequenza incidentale.

La condizione operativa "aumento di pressione", derivante dalla combinazione di:

- parola guida: more;
- variabile di processo: pressione della fase gas,

può dare vita a una deviazione significativa dagli intenti di progetto.

Nota la deviazione, il team HazOp ne ricerca tutte le possibili cause, considerando:

- i guasti dei dispositivi di protezione e regolazione del separatore "V-01";
- gli errori umani.

In questa fase, la raccolta e l'analisi di dati storici sono di grande aiuto. In prima battuta, il team esamina il caso in cui l'aumento della pressione della fase gas nel separatore è correlata al fatto che resta incollata, in posizione di chiusura, la valvola "LV-01", destinata al controllo della portata di liquido in uscita dal separatore.

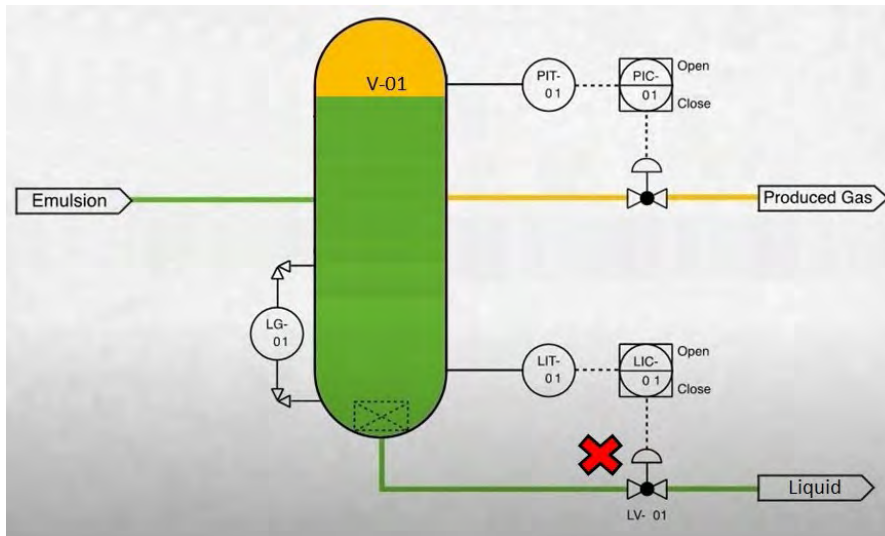


Figura 5. Guasto della valvola "LV-01"

L'aumento di pressione della fase gas nel separatore, dovuta al guasto della valvola "LV-01", può essere contrastata con l'adozione di tre barriere:

- un sistema ordinario di controllo della pressione della fase gas (BPCS);
- un sistema di monitoraggio, caratterizzato da rinvio del segnale di allarme in sala controllo;
- un sistema strumentale di sicurezza (SIS).

A quest'ultimo si affida il compito di interrompere l'alimentazione (feed) del separatore, e cioè di chiudere (shutdown) la tubazione destinata al convogliamento della miscela bifasica verso il separatore.

Il sistema strumentale di sicurezza è costituito da:

- un sensore/trasduttore (PIT 02);
- un risolutore logico (PC 02);
- una valvola di emergenza azionata (Emergency Shutdown Valve "ESDV 01").

Al fine dell'applicazione del metodo LOPA, le tre barriere adottate devono corrispondere a "Independent Protection Layers (IPL)".

In altri termini, ciascuna salvaguardia deve essere indipendente:

- dall'accadimento dell'evento iniziatore (guasto della valvola "LV-01");
- dal fallimento delle barriere adiacenti.

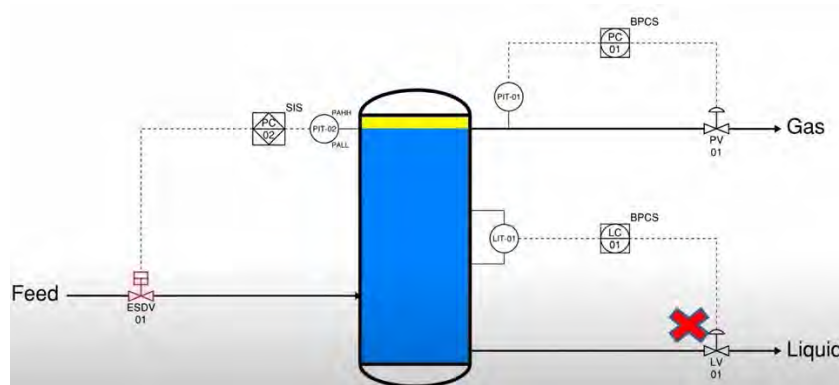


Figura 6. Salvaguardie a corredo del separatore

Rientra nelle prerogative del metodo LOPA la valutazione dell'efficacia delle tre barriere individuate dal team nel corso dell'analisi HazOp. A vantaggio della sicurezza, il team prescinde dalla valvola di sicurezza installata lungo la tubazione destinata al convogliamento della fase gas in uscita dal separatore verso la torre di addolcimento.

6. Frequenza di accadimento della causa iniziatrice

Le tre barriere individuate dal team HazOp, nel seguito richiamate per comodità:

- sistema ordinario di controllo della pressione della fase gas (process control layer);
- sistema di monitoraggio con rinvio del segnale di allarme in sala controllo (trip alarm);
- sistema strumentale di sicurezza (SIS), si rivelano idonee a fronteggiare la causa iniziatrice se, operando di concerto fra loro, sono in grado di interrompere la sequenza incidentale.

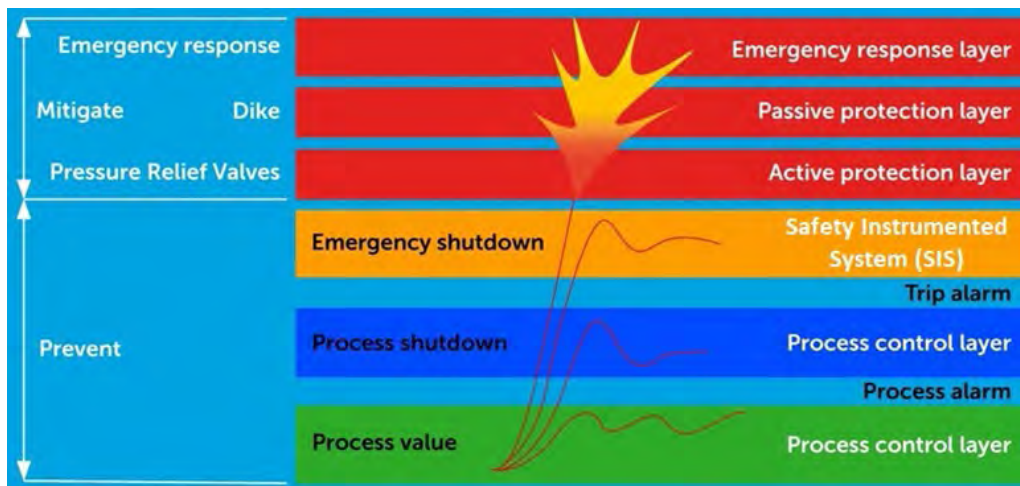


Figura 7. Sequenza incidentale

| | | |
|--------|---|-------------------------------|
| Low | A failure or series of failures with a very low probability of occurrence within the expected lifetime of the plant. EXAMPLES – Three or more simultaneous Instrument, or human failures. – Spontaneous failure of single tanks or process vessels. | $f < 10^{-4}$, /yr |
| Medium | A failure or series of failures with a low probability of occurrence within the expected lifetime of the plant. EXAMPLES – Dual instrument or valve failures. – Combination of instrument failures and operator errors. – Single failures of small process lines or fittings | $10^{-4} < f < 10^{-2}$, /yr |
| High | A failure can reasonably be expected to occur within the expected lifetime of the plant. EXAMPLES – Process Leaks – Single instrument or valve failures. – Human errors that could result in material releases. | $10^{-2} < f$, /yr |

Figura 8. Frequenza di accadimento (eventi/anno) della causa iniziatrice

Al guasto della valvola "LV-01", riportato in figura 8 come "valve failure", corrisponde una frequenza di accadimento annua uguale a 1×10^{-2} eventi/anno:

$$f_0 = 1 \times 10^{-2} \text{ eventi / anno} \quad (1)$$

7. PFD delle barriere

Allo stesso modo, il team procede alla stima della probabilità di fallimento su richiesta (PFD) delle diverse barriere.

| Protection layer | PFD |
|--|---|
| Control loop | $1,0 \times 10^{-1}$ |
| Human performance (trained, no stress) | $1,0 \times 10^{-2}$ to $1,0 \times 10^{-4}$ |
| Human performance (under stress) | 0,5 to 1,0 |
| Operator response to alarms | $1,0 \times 10^{-1}$ |
| Vessel pressure rating above maximum challenge from internal and external pressure sources | 10^{-4} or better, if vessel integrity is maintained (that is, corrosion is understood, inspections and maintenance is performed on schedule) |

Figura 9. PFD delle barriere

Il sistema di controllo della pressione della fase gas viene riguardato dalla figura 9 come "*control loop*". Ad esso corrisponde una $PFD = 1,0 \times 10^{-1}$. Ciò significa che da tale sistema ci si aspetta un fallimento ogni dieci richieste avanzate dal processo:

$$PFD_{BPCS} = 0,1 \quad (2)$$

Il sistema di monitoraggio, caratterizzato dal rinvio del segnale di allarme (trip alarm) in sala controllo, viene riguardato come "*operator response to alarms*". Ad esso corrisponde una $PFD = 1,0 \times 10^{-1}$. Ciò significa che anche da tale sistema ci si aspetta un fallimento ogni dieci richieste avanzate dal processo:

$$PFD_{alarm} = 0,1 \quad (3)$$

8. PFD_{sis}

Per interrompere la sequenza incidentale, occorre adottare diversi livelli di protezione indipendenti (IPL). Oltre ai livelli di controllo ordinario del processo (process control layer) e di monitoraggio, l'IEC 61511 prevede l'adozione di un sistema strumentale di sicurezza (SIS), idoneo a riportare il processo in condizioni di sicurezza in caso di:

- malfunzionamento del sistema basico di controllo;
- mancata o tardiva reazione dell'operatore in sala controllo.

I sistemi strumentali di sicurezza (SIS) sono sistemi elettrici, elettronici o elettronico-programmabili (E/E/EP) il cui standard, l'IEC 61508, richiede sempre piena evidenza della PFD. L'IEC 61508 mette in relazione la PFD del sistema di sicurezza con il suo livello di affidabilità: quanto maggiore è il livello di affidabilità del sistema, tanto minore è la probabilità di un suo fallimento su richiesta. Nota la PFD del sistema di sicurezza, l'IEC 61508 consente di risalire facilmente al livello di integrità della sicurezza del sistema (Safety Integrity Level, SIL).

| PFD | SIL |
|---------------------------|-----|
| $0,01 < PFD \leq 0,1$ | 1 |
| $0,001 < PFD \leq 0,01$ | 2 |
| $0,0001 < PFD \leq 0,001$ | 3 |

Tabella 1. PFD vs SIL

Il team avanza un'ipotesi di lavoro, supponendo che il processo richieda un sistema strumentale caratterizzato da SIL 2. Dalla tabella, si ricava per il SIS un valore della PFD uguale a 0,01:

$$PFD_{SIS} = 0,01 \quad (4)$$

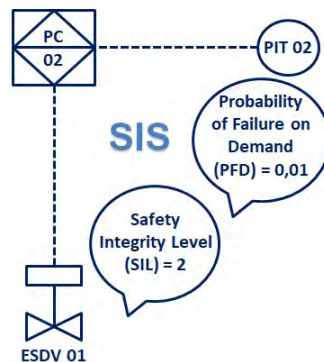


Figura 10. PFD_{SIS}

9. LOPA spreadsheet

Tutte le considerazioni tecniche fin qui sviluppate, sono evidenziate dal team in un foglio di lavoro, meglio noto come "LOPA spreadsheet". Il foglio di lavoro si presenta come un sinottico, strutturato in modo tale da facilitare l'applicazione dell'albero degli eventi al caso in esame.

| description of the initiating cause | frequency of occurrence of the initiating cause f_0 (per year) | consequence | IPL | PFD | frequency of occurrence of the scenario $f_{scenario}$ (per year) |
|-------------------------------------|--|----------------------|--|------|---|
| LV01 fails closed (stuck closed) | 1×10^{-2} | overpressure of V-01 | 1) Basic Process Control System (BPCS) | 0,1 | ? |
| | | | 2) ALARM System | 0,1 | |
| | | | 3) Safety Instrumented System (SIS) | 0,01 | |

Figura 11. LOPA spreadsheet

Il foglio di lavoro sottolinea che, al momento, è incognita la frequenza di accadimento dello scenario incidentale. Ai fini del calcolo della frequenza di accadimento dello scenario, il team decide di adottare la tecnica nota come Event Tree Analysis (ETA). L'ETA segue un percorso logico al fine di evidenziare tutte le conseguenze derivanti dal guasto della valvola "LV-01", che si suppone bloccata in chiusura. La tecnica si snoda secondo una struttura ad albero le cui diramazioni portano allo scenario

incidentale oppure a quasi incidenti (near miss). A ogni ramo, il team associa una probabilità di fallimento che corrisponde a una delle PFD che l'IEC 61511 ha consentito di stimare.

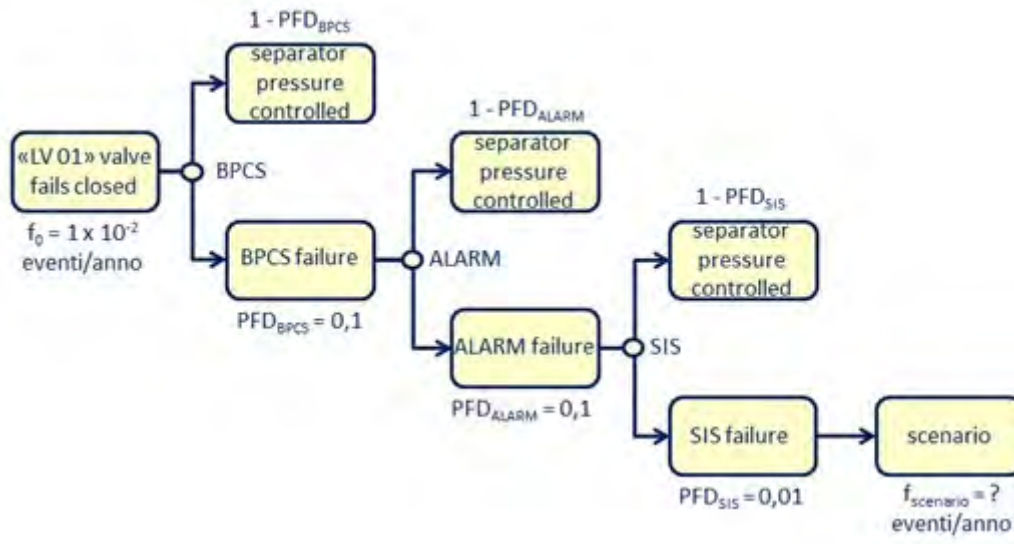


Figura 12. Event Tree Analysis

L'albero degli eventi presenta lo scenario incidentale come esito di una processione di fallimenti che, in sequenza, coinvolge:

- il sistema di controllo della pressione della fase gas ($PFD_{BPCS} = 0,1$);
- il sistema di monitoraggio ($PFD_{ALARM} = 0,1$);
- il sistema strumentale di sicurezza ($PFD_{SIS} = 0,01$).

La frequenza di accadimento dello scenario si ottiene moltiplicando la frequenza di accadimento dell'evento iniziatore (f_0) per le PFD delle tre barriere adottate:

$$f_{scenario} \left[\frac{\text{eventi}}{\text{anno}} \right] = f_0 \left[\frac{\text{eventi}}{\text{anno}} \right] \times PFD_{BPCS} \times PFD_{alarm} \times PFD_{SIS} \quad (5)$$

$$f_{scenario} \left[\frac{\text{eventi}}{\text{anno}} \right] = 1 \times 10^{-2} \left[\frac{\text{eventi}}{\text{anno}} \right] \times 0,1 \times 0,1 \times 0,01 \quad (6)$$

$$f_{scenario} \left[\frac{\text{eventi}}{\text{anno}} \right] = 1 \times 10^{-6} \quad (7)$$

A questo punto, al team HazOp non resta che il controllo finale, mirato a stabilire l'accettabilità del rischio di processo.

10. Accettabilità del rischio di processo

Il d.m. 9 maggio 2001 stabilisce i requisiti minimi di sicurezza in materia di pianificazione urbanistica e territoriale per le zone interessate dalla presenza di stabilimenti a rischio di incidente rilevante. L'obiettivo del decreto è il conseguimento della compatibilità territoriale in caso di presenza sul territorio di industrie ad alto rischio. Tale compatibilità è determinata in funzione della gravità delle conseguenze sulla salute e sicurezza delle persone rispetto alla classe di frequenza di accadimento

fissata per ciascuna categoria territoriale. Il decreto introduce sei categorie territoriali, individuate rispettivamente dalle prime sei lettere dell'alfabeto.

Ciascuna categoria è compiutamente definita in termini di magnitudo:

- lesioni reversibili, quale come peggiore conseguenza per la categoria A;
- lesioni irreversibili, come peggiore conseguenza per la categoria B;
- decesso di una persona, quale peggiore conseguenza per la categoria C;
- decesso di più persone, come peggiore conseguenza per la categoria D.

Poiché il decesso di più persone è, in genere, la conseguenza di un incidente rilevante, il team HazOp prende in esame la categoria territoriale D, le cui peculiarità possono essere così riassunte:

- aree a destinazione prevalentemente residenziale, con indice di edificabilità fondiaria compreso tra 1,0 e 0,5 m³/m²;
- località soggette a notevole affollamento, con frequentazione al massimo mensile come, ad esempio, fiere e cimiteri.

Alla categoria territoriale D, il d.m. 9 maggio 2001 associa le seguenti classi di frequenza di accadimento dei "Top Events", cioè degli scenari incidentali derivanti da incidenti rilevanti.

| effetti su salute e sicurezza | frequenza di accadimento degli scenari (eventi/anno) |
|-------------------------------|--|
| lesioni reversibili | $1 \times 10^{-3} < f_{\text{scenario}}$ |
| lesioni irreversibili | $1 \times 10^{-4} < f_{\text{scenario}} \leq 1 \times 10^{-3}$ |
| inizio letalità | $1 \times 10^{-6} < f_{\text{scenario}} \leq 1 \times 10^{-4}$ |
| elevata letalità | $f_{\text{scenario}} \leq 1 \times 10^{-6}$ |

Tabella 2. Categoria territoriale D

Il decreto non lascia spazio a dubbi: qualora lo scenario abbia in esito il decesso di più persone (elevata letalità), la frequenza di accadimento tollerabile dello scenario deve essere non superiore a 1×10^{-6} eventi/anno in zona D.

Il decreto privilegia la riduzione del rischio di processo che si consegue mediante la riduzione della frequenza di accadimento dell'evento incidentale, non considerando percorribile la riduzione del rischio che deriva dalla mitigazione della gravità delle conseguenze.

In questo senso, il decreto è in linea con il metodo LOPA la cui finalità consiste nel ridurre il rischio di processo adottando:

- barriere di prevenzione come, per esempio:
 - barriere attive (BPCS, allarme);
 - barriere funzionali (sistemi strumentali di sicurezza).

Il team HazOp conclude il proprio lavoro evidenziando che, nel caso in esame, risulta:

$$f_{\text{scenario}} = 1 \times 10^{-6} \left| \frac{\text{eventi}}{\text{anno}} \right| = f_{\text{tolerable risk}} \quad (8)$$

11. Conclusioni

Molte industrie petrolchimiche presentano un rischio rilevante per le persone e l'ambiente. Ciò è dovuto all'utilizzo di sostanze pericolose e all'adozione di processi in pressione che possono sfociare in rilasci di sostanze tossiche, incendi o esplosioni. L'importanza dei sistemi strumentali di sicurezza (SIS) in questo settore deriva dal valore aggiunto che essi apportano. I SIS contribuiscono a ridurre efficacemente i rischi all'interno e intorno al sito, garantendo un livello di rischio accettabile per le persone e l'ambiente.

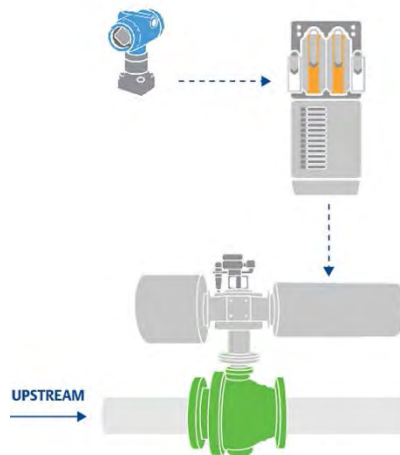


Figura 13. Sistema strumentale di sicurezza

Lo scopo dei sistemi strumentali di sicurezza consiste sostanzialmente nel riportare il processo in uno stato sicuro. Purtroppo, in caso di richiesta da parte del processo, il loro fallimento non può mai essere mai completamente escluso.

Per questo motivo, è importante:

- esaminare tutte le possibili conseguenze di un evento iniziatore;
- adottare comunque misure di mitigazione della magnitudo in modo che, in caso di incidente, lo scenario possa essere gestito limitandone gli effetti dannosi per la popolazione residente e l'ambiente circostante.

Bibliografia

[1] CEI IEC 61882 "Hazard and Operability Studies – Application Guide" - First Edition 2001.

[2] BS IEC 61511-3: 2003: "Functional Safety - Safety instrumented systems for the process industry sector" – Part 3: "Guidance for the determination of the required safety integrity levels".

[3] Fullwood Ralph R. "Probabilistic safety assessment in the chemical and nuclear industry" – Butterworth & Heinemann, Boston – ISBN 0-7506-7208-0.

Studio di un sistema di “manutenzione predittiva” dei componenti di caldaia di una centrale elettrica alimentata da biomassa combustibile

G. De Gennaro¹, D. Sallustio¹, F. Mele², A. Cocchiaro³

¹Inail – Uot di Bari

²Agripower SpA

³Consulente Agripower S.p.A.

Abstract

La centrale a biomassa di Sant’Agata di Puglia, di proprietà della Agripower S.p.A., è un impianto di produzione di energia elettrica a biomassa combustibile di origine vegetale vergine rappresentata prevalentemente da paglia di cereali, principale sottoprodotto agricolo disponibile nel raggio di circa 100 Km, oltre che da potature arboree e altri residui agroforestali del territorio.

Il generatore di vapore è costituito da una caldaia a tubi d’acqua con tre passaggi fumi; nell’impianto si presentano importanti e frequenti fenomeni di corrosione nei surriscaldatori SH2 e SH3 presenti nella camera di combustione, con meccanismi molto complessi a causa della composizione chimica dei fumi di combustione delle biomasse utilizzate. Nonostante l’utilizzo di materiali notoriamente resistenti alla corrosione, quali l’INCONEL 625 e l’AISI 347, si riscontrano rotture impreviste, danneggiamenti con conseguenti fermi impianti non programmabili.

Il lavoro analizza le risultanze di uno studio relativo ad un sistema di «manutenzione predittiva» dei componenti della caldaia, sulla base di un approfondito studio di laboratorio inteso ad individuare i complessi meccanismi di corrosione e pervenire ad accorgimenti sulle modalità di conduzione, al fine di ridurre per quanto possibile le rotture delle serpentine e consentire una manutenzione in occasione delle sole fermate programmate.

Keywords: centrale termoelettrica a biomasse, manutenzione predittiva, corrosione.

1. Configurazione del generatore

La centrale a biomassa di Sant’Agata di Puglia è un impianto di recupero energetico da biomassa combustibile. È alimentato da biomassa solida di origine vegetale vergine rappresentata prevalentemente da paglia di cereali, principale sottoprodotto agricolo disponibile in provincia di Foggia, oltre che da potature arboree e altri residui agroforestali del territorio.

Il generatore di vapore è costituito da una caldaia a tubi d'acqua con tre passaggi fumi. A valle della caldaia è posto un recuperatore di calore con funzione di preriscaldatore dell'aria primaria di combustione.

Il materiale combustibile è alimentato sulla griglia vibrante di combustione. I fumi caldi scambiano con gli scambiatori SH2 posti nella parte sommitale del primo passaggio fumi. I fumi passano quindi nel secondo passaggio e, con flusso discendente, interessano lo scambiatore SH3.

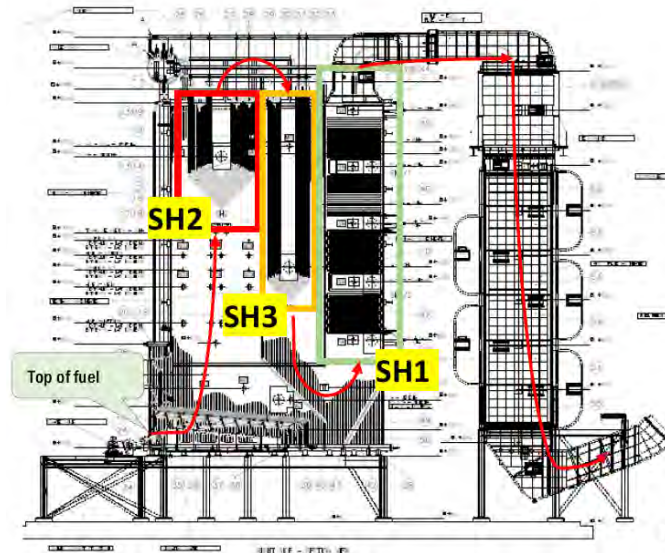


Figura 1. Sezione Generatore di calore

La temperatura e tipologia dei fumi e la temperatura del vapore, all'interno delle tubazioni, comportano problematiche di usura dei banchi surriscaldatori posizionati nei diversi giri fumi della caldaia con conseguente corrosione superficiale delle tubazioni. Tali problematiche determinano la necessità di interventi di manutenzione con sostituzione delle tubazioni che presentano riduzione di spessore spesso localizzate.

2. Il percorso dei fumi

I passaggi in caldaia dei fumi sono direttamente consecutivi alla camera di combustione. Nei passaggi i fumi sono raffreddati per scambio termico radiante e convettivo con il circuito acqua/vapore della caldaia.

I passaggi fumi sono quattro, a sviluppo verticale. I primi tre hanno le pareti costituite da tubi di scambio (vaporizzatori), saldati tra loro tramite alette per la tenuta.

Il primo passaggio è costituito da una camera realizzata con pareti membranate all'interno della quale è collocato lo scambiatore SH2. Il secondo passaggio, in aggiunta alle pareti membranate, è equipaggiato con addizionali scambiatori a "pannelli", sospesi (surriscaldatori SH3). Nel terzo passaggio fumi trovano posto gli scambiatori SH1.

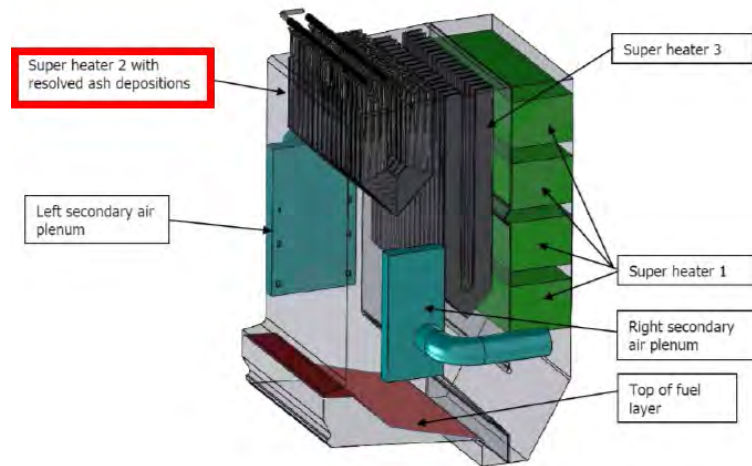


Figura 2. Posizione Surriscaldatori

3. Problematiche riscontrate

Nell'impianto a biomasse di Sant'Agata in Puglia avvengono fenomeni di corrosione periodici negli scambiatori di calore presenti nella camera di combustione, con particolare riferimento ai superheater SH2 e SH3. Queste rotture impreviste causano guasti e fermi impianto fuori dall'attività di manutenzione ordinaria (prevista una volta l'anno). È emersa così la necessità di avviare la progettazione di un sistema di «manutenzione predittiva» dei componenti della caldaia al fine di prevedere le rotture di tubi e serpentine e concentrare gli eventuali interventi di manutenzione nell'unico momento di fermo impianto «recurrent» nel mese di Maggio. L'analisi presentata è relativa agli scambiatori SH2.

4. Obiettivi del progetto

Gli obiettivi perseguiti dal progetto sviluppato sono:

- Mappatura dei processi, sistemi e flusso dati concernenti l'impianto e la camera di combustione
- Analisi delle correlazioni tra le rotture e altri parametri come la temperatura, la vita utile e lo spessore del tubo, la chimica di processo (es. ciclo di Cl_2) mediante il prelievo di provini dagli scambiatori SH2 e l'analisi dei meccanismi di corrosione
- Stima della vita media utile dei tubi e stima delle sostituzioni preventive (per fermata di maggio 2021)
- Identificazione delle azioni da svolgere sulla base dei risultati delle analisi chimiche e sulla base delle considerazioni del progetto
- Mappatura degli attuali sensori ed eventuale scouting di sensoristica più adatta a raccogliere i dati in camera di combustione (T, H, Cl, K, etc..)

5. Risultati e benefici

I risultati ottenuti dal progetto possono essere riassunti in:

- Previsione delle rotture dei componenti e degli interventi di manutenzione nell'unica fermata di manutenzione programmata
- Riduzione dei costi legati alla mancata produzione e agli interventi di manutenzione straordinaria
- Miglioramento dei processi di manutenzione
- Nuovo sistema di manutenzione in chiave predittiva relativa alle componenti primarie e secondarie delle caldaie

6. Descrizione SH2 ed area di prelievo campioni

Il surriscaldatore SH2 è realizzato con tubazioni ripiegate a formare una V. I collettori sono esterni alla caldaia. Lo scambiatore è costituito da 16 serpentine sospese dall'alto. Le serpentine sono numerate da 1 a 16 da sinistra. Le tubazioni delle singole serpentine sono numerate da 1 a 48 dalla parete frontale verso la posteriore.

Le tubazioni sono realizzate in AISI 310 diam. 33,7 mm. sp. 5,0 mm.

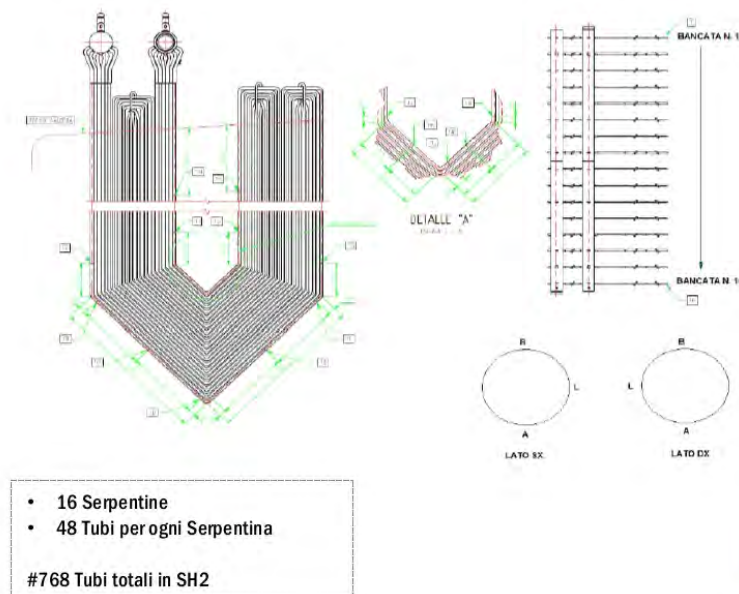


Figura 3. Dettaglio serpentine SH2

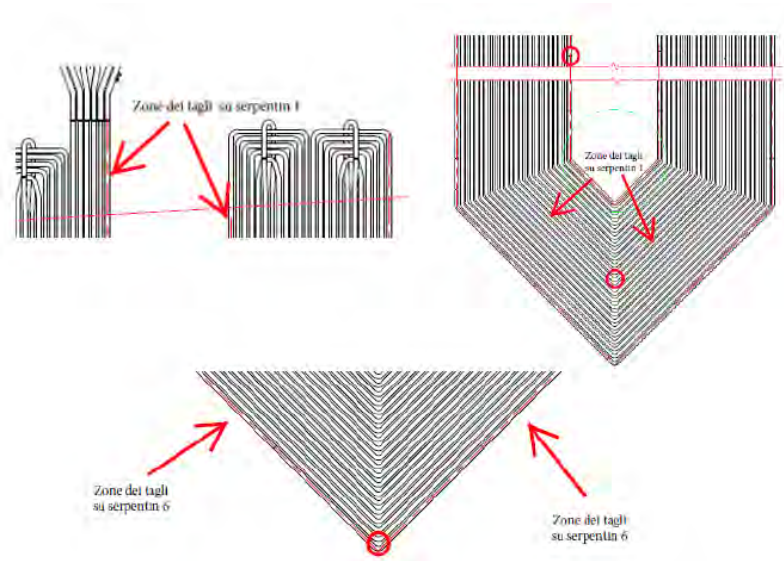


Figura 4. Area di campionamento provini

7. Analisi chimiche e processo di corrosione del metallo

Gli esami metallurgici di tutti i campioni di tubi hanno mostrato estesi attacchi di corrosione, tutti con un meccanismo simile (ossidazione attiva nota anche come corrosione da cloro).

Questo meccanismo di corrosione si verifica in atmosfere di gas di combustione da biomasse combustibili con cloruri e metalli alcalini, a temperature superiori a 400 °C.

Le velocità di corrosione attiva sono normalmente accettabili a temperature del metallo fino a circa 480 °C. Le velocità di corrosione sono aumentate ma ancora accettabili per temperature superficiali del metallo di 480-520 °C, mentre per temperature del metallo superiori a 520 °C, (con temperatura media di parete comunque entro i limiti di progetto della membratura) le velocità di corrosione sono aumentate esponenzialmente e sono risultate inaccettabilmente alte.

È stato riscontrato attraverso il confronto tra le misurazioni della temperatura superficiale del tubo e l'analisi CFD, che detta temperatura superficiale effettiva dell'acciaio potrebbe essere fino a qualche decina di gradi superiore e, come già detto, con temperatura media di parete, comunque, entro i limiti di progetto della membratura.

Deposito di KCl (e NaCl) dai fumi sui tubi SH

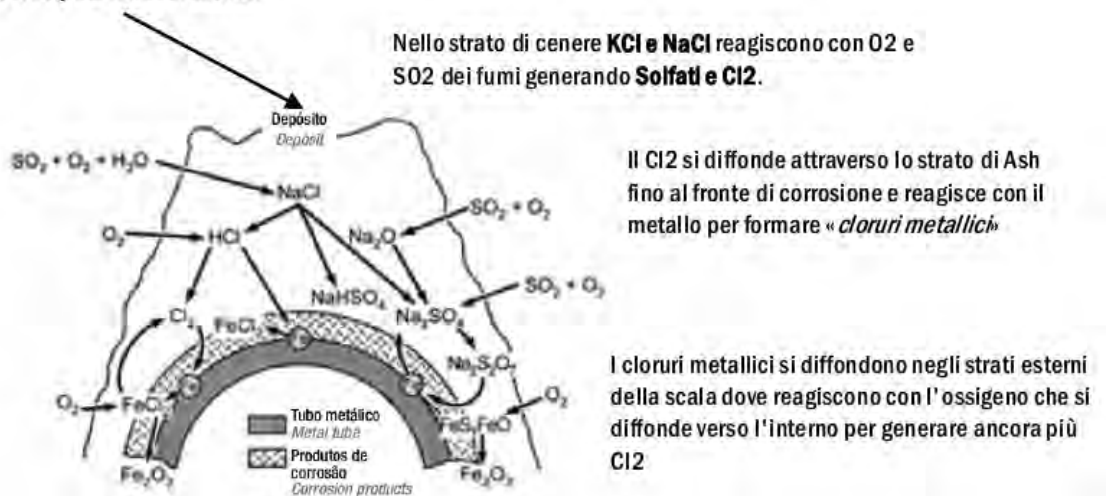


Figura 5. Processo ciclico, in cui Cl_2 dissolve sempre più metallo

Il processo è controllato o regolato dalla temperatura una volta che sono state depositate quantità sufficienti di cloruri alcalini.

Le condizioni che forniscono condizioni riducenti periodiche sulla superficie dei depositi possono modificare le reazioni che generano Cl_2 nei depositi e nelle incrostazioni, ma di per sé portano ad una maggiore porosità della scala e successivamente le velocità di corrosione aumenteranno quando viene ripristinato un surplus di ossigeno.

8. Analisi CFD (Computational Fluid Dynamic)

Sono state eseguite analisi computerizzate di fluidodinamica della combustione per determinare la distribuzione di temperatura nelle diverse sezioni dello scambiatore SH2.

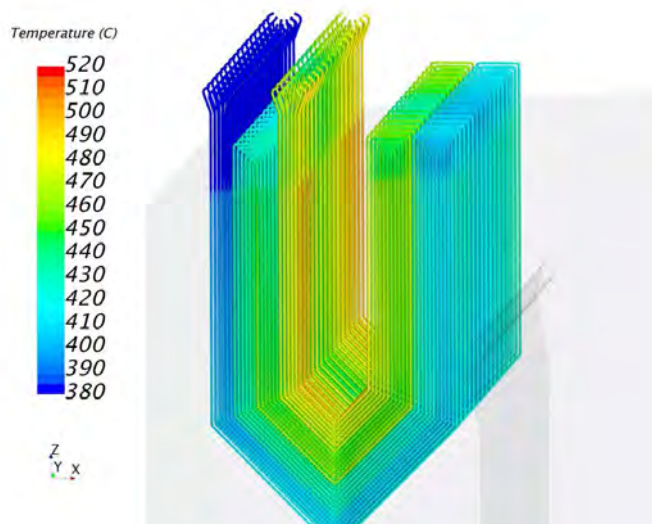


Figura 6. Distribuzione della temperatura di pelle

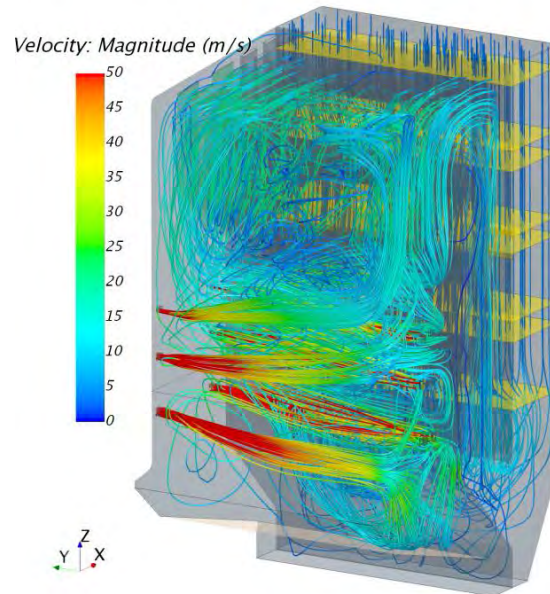


Figura 7. Flussi di aria dagli ugelli di sinistra con relativa velocità

Dalle analisi svolte risulta che la temperatura dei fumi nella camera di combustione, nella parte inferiore di SH2, risulta essere di circa 1.100-1.200 °C e di circa 1.000 °C dopo SH2 e la temperatura dei fumi nel secondo passo è di circa 780 °C. Risulta inoltre che il tubo interno dell'SH2 (nelle posizioni 24 e 25 di ogni serpentino) è notevolmente più caldo (520 °C) rispetto ai 5 tubi adiacenti (490-500 °C).

La temperatura dell'acciaio ottenuta nel CFD è superiore alle temperature operative registrate. Ciò è molto probabilmente dovuto alla mancanza di raffreddamento dell'ambiente circostante nella «zona morta». Anche la temperatura media operativa del vapore è prossima alle temperature massime registrate dalla sonda indicando che le sonde non misurano la temperatura reale del vapore, ma la sottovalutano.

C'è una distribuzione irregolare della temperatura massima della camera d'aria tra le 16 file di serpentine; più caldo nelle serpentine 1-5 e 11-16. La velocità dell'aria secondaria è molto elevata, con un massimo al centro degli ugelli superiore a 150 m/s su una media di 90-100 m/s. Le linee di flusso d'aria secondarie indicano che c'è un flusso d'aria che scende verso lo strato di combustibile ai lati e può causare il sollevamento di cenere e materiale incombusto dalla griglia. Può trasportare particelle dalla zona di combustione alle superfici SH2.

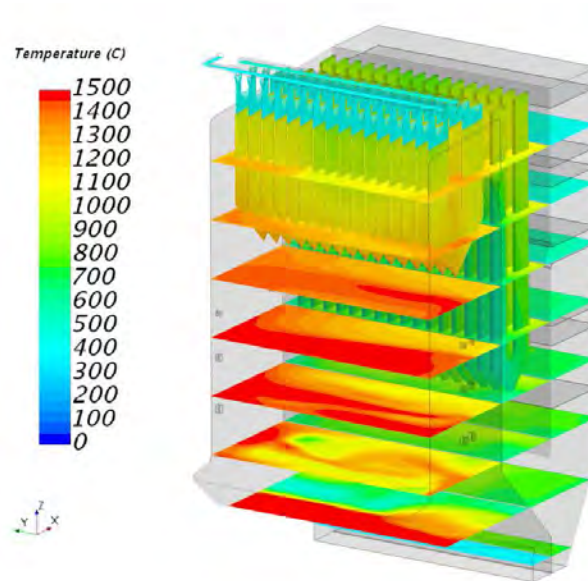


Figura 8. Distribuzione della temperatura a diverse quote

Se il flusso d'aria primaria non viene ridotto durante la vibrazione della griglia, il combustibile può essere rilasciato dalla griglia e le correnti d'aria secondarie più grandi possono facilmente trasportare le particelle più in alto se vengono rilasciate. La materia non bruciata nella parte inferiore del secondo e terzo passaggio indica periodi con grandi quantità di materia incombusta. La concentrazione di ossigeno è completamente miscelata quando il gas di combustione raggiunge le superfici SH2 nella parte alta della caldaia e non diventa inferiore al 4% dopo questo punto. Tuttavia, se dalla griglia vengono trasportate grandi quantità di materiale, in concomitanza del suo scuotimento possono causare regioni magre di ossigeno locale.

9. Analisi chimiche del combustibile

Ulteriori analisi hanno riguardato la composizione chimica della paglia

Table 9. Selected results of straw analyses, in comparison with typical values for virgin straw, wheat, rye and barley cf. CEN/TS 14961:2005.

| Parameter | basis | unit | typical* | 2016 | | | | | 2017 | |
|--------------------------------|-------|-------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | | | A | B | C | D | E | 1 | 2 |
| Moisture | ar | % | - | 13,8 | 9,8 | 12,1 | 13,6 | 11,1 | 9,4 | 12,8 |
| Ash | d | % | 5 | 10,2 | 12,4 | 9,4 | 9,9 | 14,0 | 8,8 | 9,9 |
| Vol. matter | daf | % | - | 80,6 | 79,7 | 79,5 | 80,0 | 81,2 | 79,3 | 78,8 |
| Sulphur | d | % | 0,1 | 0,076 | 0,064 | 0,098 | 0,089 | 0,084 | 0,074 | 0,13 |
| Chlorine | d | % | 0,4 | 0,38 | 0,37 | 0,37 | 0,56 | 0,38 | 0,53 | 0,69 |
| Hydrogen | daf | % | 6,3 | 6,1 | 6,1 | 6,2 | 6,4 | 6,4 | 6,1 | 6,1 |
| Carbon | daf | % | 49 | 49,5 | 48,7 | 48,8 | 47,7 | 48,4 | 48,4 | 48,7 |
| Nitrogen | daf | % | 0,5 | 0,52 | 0,54 | 0,55 | 0,60 | 0,48 | 0,53 | 0,59 |
| GCV | ar | MJ/kg | - | 14,88 | 15,00 | 15,45 | 15,12 | 14,62 | 15,80 | 15,12 |
| NCV | ar | MJ/kg | - | 13,51 | 13,71 | 14,08 | 13,70 | 13,28 | 14,47 | 13,76 |
| NCV | d | MJ/kg | - | 16,07 | 15,46 | 16,34 | 16,24 | 15,24 | 16,21 | 16,15 |
| NCV | daf | MJ/kg | 18,5 | 17,91 | 17,64 | 18,04 | 18,03 | 17,72 | 17,78 | 17,91 |
| Ash fusibility | | | | | | | | | | |
| DT | | ° C | - | 1010 | 1120 | 1020 | 1020 | 1130 | 830 | 860 |
| HT | | ° C | - | 1240 | 1230 | 1220 | 1170 | 1220 | 1120 | 1140 |
| FT | | ° C | - | 1300 | 1320 | 1270 | 1220 | 1280 | 1310 | 1320 |
| Major elements, fuel | | | | | | | | | | |
| Si | d | g/kg | 10 | 34 | 35 | 34 | 28 | 49 | 25 | 26 |
| Al | d | g/kg | 0,05 | 3,4 | 4,9 | 2,5 | 2,8 | 6,3 | 1,6 | 1,6 |
| Fe | d | g/kg | 0,1 | 1,5 | 2,3 | 1,2 | 1,4 | 3,0 | 0,85 | 0,92 |
| Ca | d | g/kg | 4 | 4,4 | 6,9 | 5,0 | 5,8 | 7,0 | 4,5 | 4,0 |
| K | d | g/kg | 10 | 8,2 | 7,6 | 7,0 | 10 | 6,8 | 14 | 16 |
| Na | d | g/kg | 0,5 | 1,9 | 2,4 | 2,4 | 3,3 | 3,0 | 1,3 | 2,1 |
| Oxide elements, fuel ash | | | | | | | | | | |
| SiO ₂ | ia | % | - | 65 | 61 | 63 | 64 | 71 | 55 | 55 |
| Al ₂ O ₃ | ia | % | - | 5,9 | 8,3 | 4,7 | 5,1 | 8,9 | 2,8 | 2,7 |
| Fe ₂ O ₃ | ia | % | - | 2,0 | 2,7 | 1,6 | 1,9 | 3,2 | 1,1 | 1,2 |
| CaO | ia | % | - | 6,8 | 8,7 | 8,1 | 8,1 | 7,2 | 6,9 | 4,9 |
| K ₂ O | ia | % | - | 10 | 7,7 | 8,7 | 12 | 5,9 | 17 | 17 |
| Na ₂ O | ia | % | - | 2,5 | 2,4 | 2,9 | 3,5 | 3,0 | 1,6 | 2,5 |

ar = as received basis, d = dry basis, daf = dry and ash free basis, ia = in ash, GCV = Gross Calorific Value, NCV = Net Calorific Value. * Cf. CEN/TS 14961:2005.

Figura 9. Risultati delle analisi eseguite sulla paglia

È possibile osservare una correlazione tra Ash Fly e il contenuto di Si e Al e DT (deformation temperature): maggiore è la quantità di cenere, maggiore è il contenuto di Si, Al e DT. Si e Al sono componenti tipici del suolo.

I valori di Ash Fly elevati possono essere dovuti a due aspetti principali.

- Il metodo di raccolta in campo (ranghinatura (*)) della paglia; il ranghinatore va troppo in profondità nel terreno.
- Le condizioni meteorologiche (pioggia e vento) avverse che condizionano l'operatività della campagna raccolta paglia.

(* la ranghinatura è un'operazione svolta nell'ambito della fienagione che consiste nella movimentazione del foraggio sfalciato allo scopo di raccoglierlo in cumuli longitudinali detti andane. Si esegue con macchine agricole che surrogano meccanicamente l'uso manuale del rastrello.

10. Misurazione delle temperature

Le temperature in camera di combustione sono state rilevate in continuo durante l'esercizio con termocoppie di tipo K a diverse quote.

11. Rilievo dei dati storici delle rotture per ogni serpentina

Il rilievo dei dati di funzionamento e degli eventi di danneggiamento o rottura è stato eseguito analizzando i dati storici nel periodo temporale aprile 2017- febbraio 2021. La mappatura di eventi per tubo e serpentina ha consentito di raccogliere informazioni relativamente a 319 osservazioni/eventi identificati per Mese, Anno, #Serpentina, #Tubo.

È stata inoltre catalogata la probabile causa dell'evento: rotture, sostituzione per danneggiamento o sostituzione preventiva.

Altresì sono state eseguite elaborazioni e statistiche relativamente alle temperature degli skin point delle serpentine osservandone il profilo di temperatura, la media, massima, minima e varianza.

I dati estratti sono riassunti nelle tabelle successive.

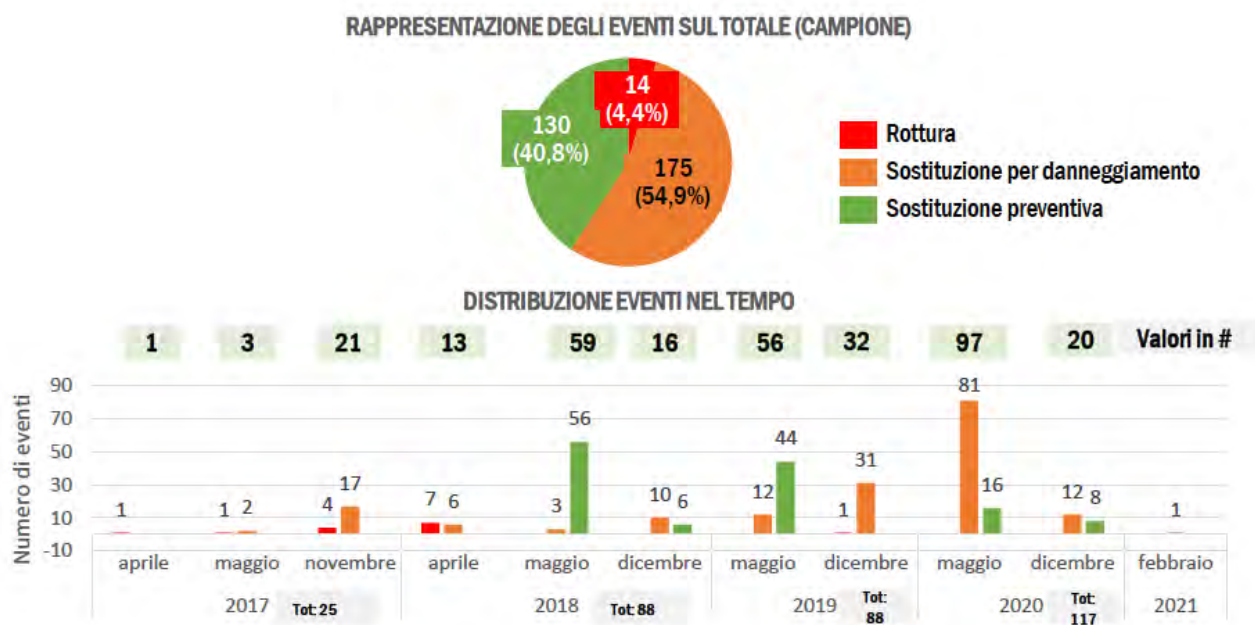


Figura 10. Rappresentazione temporale degli eventi di rottura

Si osserva un alto numero di sostituzioni per danneggiamento o rottura (~ 60% del totale) rilevato dopo ispezione visiva e controlli spessimetrici ed un alto numero di eventi di rottura/danneggiamento ogni anno (in trend crescente).

Il grafico successivo rappresenta le categorie di eventi accaduti in funzione dei 16 serpentini che compongono il banco SH2 e degli eventi occorsi a ciascuno dei 48 tubi che compongono ogni singolo serpentino.

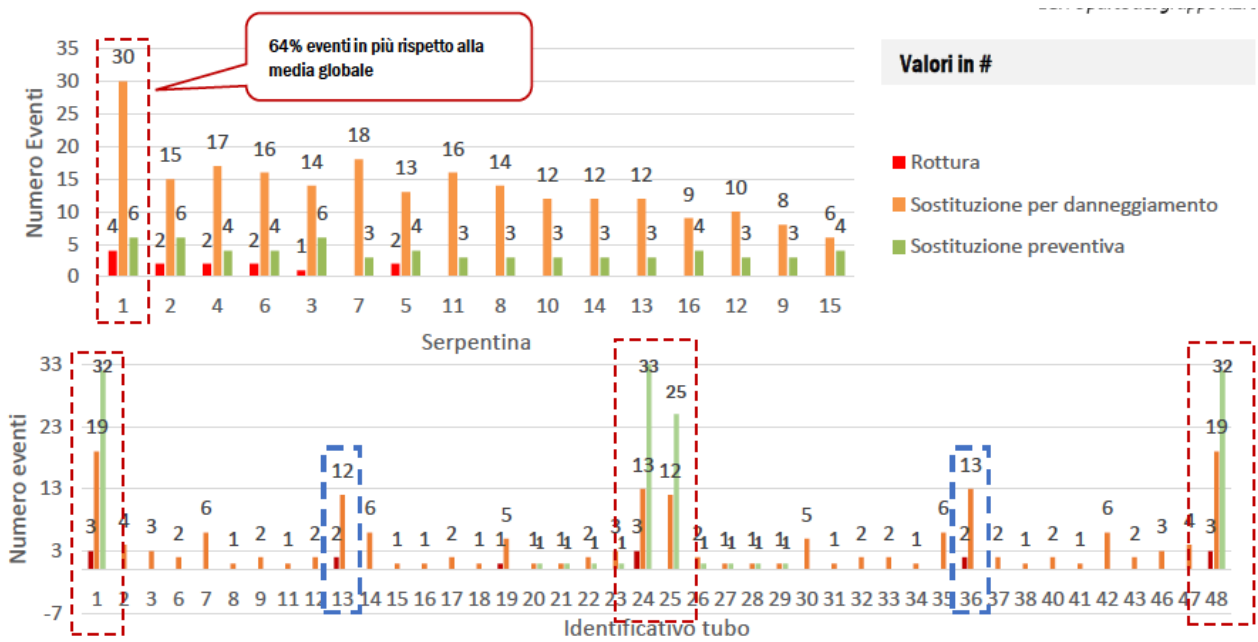


Figura 11. Distribuzione del numero di eventi per serpentina

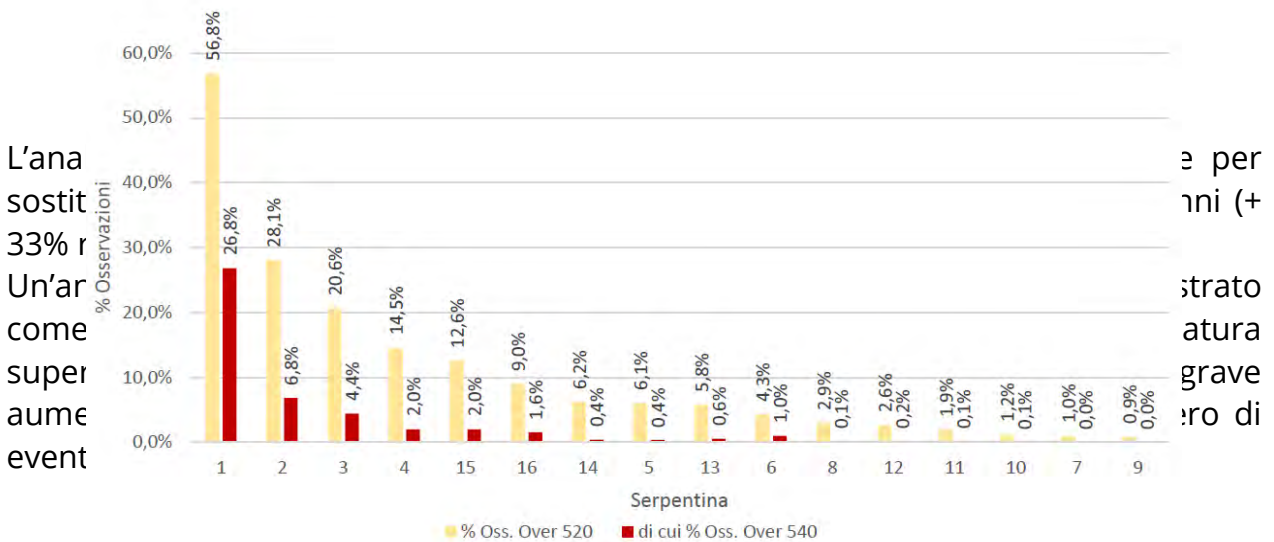
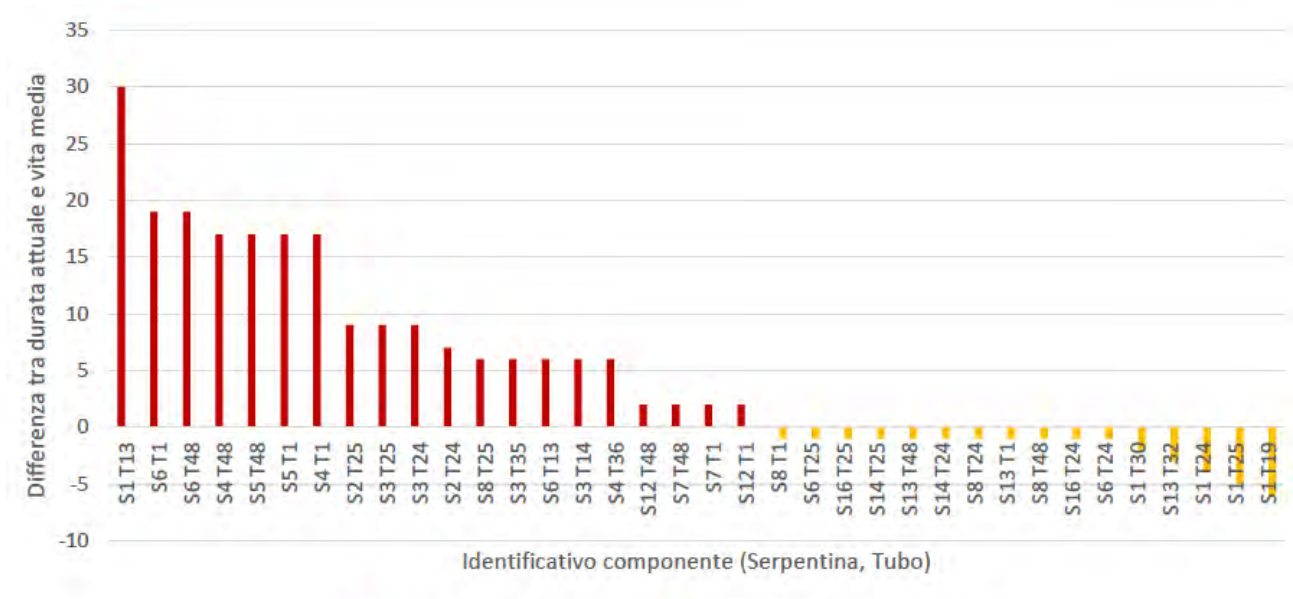
La serp. #1 ha un numero di eventi molto più elevato rispetto alle altre (%64 in più rispetto alla media)

- Le prime 9 serpentine nel grafico (esclusa la 1) hanno un numero di eventi leggermente maggiore rispetto alle altre (media 20 vs media 13)
- I tubi #1, 48, 24, 25 sembrano essere più esposti a deterioramento, seguiti da #13,36

Nel grafico successivo è rappresentata la differenza tra la durata dei componenti a Maggio 2021 e la sua vita utile nello storico degli eventi tracciati.

Le componenti con differenza più alta hanno un rischio più elevato di danneggiarsi fino alla fermata di Maggio 2021 (Differenza >0).

Le componenti con (Differenza > -12) sono a rischio danneggiamento entro Maggio 2022.



12. Conclusioni

Le analisi presentate hanno evidenziato che la serpentina 1 è maggiormente soggetta a corrosione (65% eventi in più rispetto a media Serpentine in SH2). La posizione delle restanti serpentine ha una leggera correlazione col numero di eventi di danneggiamento.

La posizione dei tubi all'interno delle serpentine è correlata al numero di danneggiamenti. In particolare, si distinguono:

- Tubi (1,48) e (24,25) Priorità 1
- Tubi (13,36) Priorità 2
- Tubi (7,42), (14,35), (19,30) Priorità 3

Considerando la vita utile dei tubi tra una sostituzione e un'altra si possono identificare potenziali componenti a rischio da attenzionare nelle fermate programmate.

Dall'analisi sulle temperature superficiali dei tubi, si nota come temperature elevate causino l'accelerazione del processo di corrosione e di conseguenza a danneggiamenti precoci dei componenti.

È noto che lo zolfo può impedire o ridurre la velocità di corrosione attiva se presente in quantità sufficiente nella parte più calda del flusso di gas di combustione. Lo zolfo potrebbe essere utilizzato con il combustibile o combustibile contenente zolfo co-bruciato o essere aggiunto nel gas di combustione tipicamente sopra gli ugelli dell'aria secondaria. Lo zolfo reagisce con i metalli alcalini nei fumi nel cosiddetto processo di solfatazione, alterando la chimica dei depositi sulle superfici dei tubi del surriscaldatore. Nel caso in cui il contenuto di zolfo sia troppo basso per avere una solfatazione sufficiente o nel caso in cui la temperatura dei fumi sia troppo alta nella parte superiore del passaggio del forno, KCl raggiungerà il secondo passaggio in quantità sufficienti per causare corrosione attiva anche qui se le temperature del metallo sono abbastanza alte. **A causa delle altissime temperature del metallo in SH2 e SH3, la temperatura sia il fattore più cruciale, che è necessario cambiare, per limitare la corrosione.**

Per ridurre le temperature caratteristiche della combustione di biomasse in uso nell'impianto, può essere una soluzione la co-combustione con combustibili ad alto contenuto di K. Il residuo di legname contiene meno Si e un po' più di K della paglia. Se si sceglie la co-combustione con scarti lavorazione di olive da produzione di olio d'oliva (olive cakes), è anche possibile che le temperature di fusione possano essere abbassate, poiché questi prodotti di scarto contengono spesso molto K rispetto al Si. I resti degli scarti di olive (olive cakes) possono anche contenere Ni, che quindi potrebbe non essere riciclabili come fertilizzante.

13. Action plan

Le principali azioni correttive da intraprendere possono essere:

1. I tubi (1,48) e (24,25) con priorità 1 verranno tutti sostituiti in maniera preventiva e massiva come da programma
2. I tubi (13,36) a Priorità 2 saranno sostituiti (da validare emissione contratto per approvvigionamento) con INCONEL invece che AISI (preventivato) considerato l'indice di rischio emerso dall'analisi. Nel caso di scarsità nella possibilità di approvvigionamento verrà data priorità alle serpentine con maggior numero di eventi di danneggiamento e con temperature più alte, descritte nell'analisi.
3. I tubi (19,30) con Priorità 3 saranno gestiti con la sostituzione preventiva dei tubi passando da AISI 310 ad AISI 347 (EN 10216-5 X7CrNiNb 18-10) come da programma.
4. I tubi (7,42) e (14,35) con Priorità 3 sono stati nel corso della loro vita utile sostituiti con materiale diverso, grazie al quale si sono ridotti i fenomeni di corrosione, per cui non si prevedono ulteriori azioni di sostituzione. Pertanto, verranno solo attenzionati nell'ispezione visiva durante la prossima fermata.

14. Bibliografia

- [1] Tania Cerquitelli, Massimo Ippolito, Enrico Macii, Sotirios Makris - Predictive Maintenance in Smart Factories, 2021
- [2] Analisi esplorativa preliminare fermate impianto a biomasse di sant'Agata, LGH Gruppo A2A
- [3] Dr. E.C. Fitch - Proactive Maintenance for Mechanical Systems, 2013
- [4] M. Shahidehpour, M. Marwali - Maintenance Scheduling in Restructured Power Systems. 2012
- [5] Rapporto CISE-SCC-94-95. Stato dell'arte sul problema della corrosione ad alta temperatura negli inceneritori.

Gestione del rischio nell'ambito portuale

C. Piccolo¹, M.M. La Veglia², N.N. Pagano³, M. Affinita³, J. Pardi⁴, D. Salzano⁵

¹ Inail - Uot di Avelino

² Direzione Regionale Campania Vigili del Fuoco

³ Autorità di Sistema Portuale del Mar Tirreno Centrale

⁴ Energas s.p.a.

⁵ Workin'626 s.r.l.

Abstract

La tragedia del crollo della "Torre piloti" del porto di Genova del 2013 [1] ha evidenziato la "criticità di posizionamento" di alcune strutture in ambito portuale in relazione al transito di mezzi navali ed al rischio indiretto da eventuali urti e crolli di strutture in pressione con i conseguenti danni da incendio e esplosione.

Nel presente studio si procederà preliminarmente ad un'analisi dello stato dell'arte del quadro normativo in ambito portuale in relazione ai disposti normativi di cui al D.Lgs. 81/08 ed alle normative specifiche di settore.

La gestione del rischio in ambito portuale ha sempre visto prima l'ex ISPESL e poi dal 2010 l'INAIL in prima linea mediante la partecipazione ai SOI Sistema Operativo Integrato sottoscritti per il tramite delle Prefetture già dagli anni 2007 per i Porti di Napoli, Genova, Ravenna, Venezia e Trieste e tutt'oggi ancora in essere in alcuni porti italiani.



Figura 1. Vista aerea del Porto di Genova: sulla sinistra gru portuali e serbatoi; sulla destra il punto nel quale era posizionata la Torre Piloti prima del crollo. [11]

Sulla base degli eventi incidentali e delle statistiche su eventi che hanno visto il coinvolgimento di strutture portuali nelle fasi di movimentazione e transito di navi e mezzi portuali, si analizzeranno le attività messe in essere per la protezione delle strutture stesse e per la definizione di attività di controllo e gestione dei movimenti portuali con i relativi regolamenti. Saranno analizzate in maniera specifica le attività svolte nel **Porto di Napoli** in relazione alla presenza della Darsena Petroli (alias Terminal Petrolifero) ed alla gestione del traffico portuale nell'area interessata. Si riporteranno altresì le modalità operative svolte dagli organi di controllo e gestione dei porti relativamente ad emergenze incendi o di altra natura.

Keywords: porto, incendio, navi.

1. Il quadro normativo nell' ambito portuale

La riforma operata dal cd. "Testo unico" della salute e sicurezza sul lavoro n.81/2008, ancora oggi, a distanza di oltre un decennio dalla sua entrata in vigore, non può dirsi, tuttavia, ancora completamente compiuta; infatti, il suo complesso mosaico disegnato dal legislatore, caratterizzato da molteplici sfumature, presenta diversi importanti tasselli mancanti. Infatti, ad una sua attenta lettura ci si accorge che, in effetti, non solo mancano all'appello diversi decreti attuativi ma anche alcuni importanti decreti di riordino e di coordinamento con i principi introdotti dal d.lgs. n.81/2008, della disciplina speciale prevista per quei settori che presentano alcune particolarità.

Invero, sotto tale profilo risulta particolarmente emblematico il caso dei settori marittimo e portuale; infatti, l'art. 3, c.2, del d.lgs. n.81/2008, prevede espressamente il riassetto della normativa contenuta nei d.lgs. n.271/1999 e n.272/1999, attraverso l'emanazione di nuovi provvedimenti di aggiornamento ma, malgrado diverse proroghe, ciò non è ancora avvenuto; le cause sono molteplici, ma l'elemento fondamentale è che, attualmente, la tutela della salute e della sicurezza delle lavoratrici e dei lavoratori operanti in ambito marittimo – portuale poggia ancora le sue basi su un regime provvisorio, in cui le disposizioni contenute nel d.lgs. n.81/2008, hanno carattere generale e trovano, quindi, applicazione anche in tali settori, ma "convivono" senza un adeguato coordinamento con i già citati d.lgs. n.271/1999 e n.272/1999, generando così non poche criticità applicative per gli operatori.

Peraltro, tutto ciò è complicato anche da una normativa generale particolare che, per il lavoro a bordo delle navi, risente della bandiera battente e, malgrado i notevoli passi in avanti compiuti sulla complicata strada dell'uniformazione internazionale attraverso la ratifica, anche da parte dell'Italia, della Maritime Labour Convention 2006 dell'ILO, presenta ancora molteplici zone d'ombra; nemmeno la disciplina della legge 28 gennaio 1994, n. 84, che ha operato il riordino della legislazione in materia portuale, consente di superare le tante criticità presenti.

Eppure, si tratta di settori che compongono la trainante economia del mare – che nel nostro Paese ha segnato nel corso dell'ultimo decennio una notevole crescita – ma che, specie per quanto riguarda quello portuale, fa rilevare un trend infortunistico preoccupante in quanto si registra l'esposizione dei lavoratori e delle lavoratrici a notevoli rischi, di cui una categoria particolarmente significativa è rappresentata da quelli di natura interferenziale.

Il porto costituisce, infatti, un particolare "teatro" lavorativo, dove sono numerosi gli attori e le variabili, anche ambientali, in gioco; inoltre, sono molteplici i fattori rispetto ai quali l'attuale sistema normativo appare ormai inadeguato: forte interazione uomo-macchina-strutture, alto carico organizzativo, frammentazione delle attività tra più soggetti, alta intensità del lavoro umano, elevati ritmi e intensità dei processi, sono solo alcuni degli elementi critici che caratterizzano lo scenario portuale, in cui la valutazione e la gestione dei rischi da interferenze, anche cd. "esterni", hanno una rilevanza fondamentale ai fini della predisposizione delle adeguate misure di prevenzione e protezione, anche per quanto riguarda la protezione della popolazione e dell'ambiente in caso d'incidenti provocati da incendi, esplosioni e danneggiamenti di strutture, attrezzature e apparecchi a pressione durante le attività di carico e scarico delle navi.

Per tali motivi, quindi, appare fortemente auspicabile l'intervento del legislatore, attraverso un riassetto organico della disciplina in materia; sotto tale profilo va rilevato che nel mese di febbraio del 2023 presso il Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti è stato avviato un tavolo tecnico sulla sicurezza del lavoro in ambito portuale: la speranza è che possa portare, in tempi brevi, buoni frutti attraverso un disciplina basata su soluzioni normative condivise chiare e di agevole applicazione, che favorisca anche un maggiore dialogo tra i diversi soggetti coinvolti all'interno del sistema portuale e introduca un modello specifico avanzato per la gestione delle dei rischi da interferenze.

2. La gestione della sicurezza in ambito portuale

2.1 Premessa

Al fine di analizzare le modalità operative e gestionali della sicurezza nei porti si riportano di seguito alcuni riferimenti normativi e procedurali con specifico riferimento ai compiti delle Autorità Marittime e Portuali nonché a quanto indicato nei Codici di Navigazione e dei Regolamenti Portuali.

2.2 L' autorità marittima

Compiti dell'Autorità Marittima, tra gli altri, sono la salvaguardia della vita umana, la sicurezza della navigazione, la tutela dell'ambiente. Particolare rilievo assume l'amministrazione diretta della navigazione svolta dal Ministero dei Trasporti e dal Comando Generale delle Capitanerie di Porto fondamentale organo dell'amministrazione marittima. In rapporto alla **sicurezza della navigazione** il Corpo delle Capitanerie svolge attività sia nell'ambito della cd. safety sia nell'ambito

della cd. security, intendendosi con la prima quell'attività tesa a far rispettare l'insieme delle norme tecniche finalizzate a tutelare la nave contro i rischi della navigazione, mentre con la seconda quell'attività volta a prevenire ed a combattere minacce di stampo terroristico.

Nell'ottica della safety, di primaria importanza il Vessel Traffic Service (VTS) che consiste in un sistema altamente tecnologico, gestito da personale delle Capitanerie, teso a garantire una maggiore sicurezza del traffico marittimo, agevolare la navigazione, favorire gli interventi in caso di incidenti o pericoli e prevenire fenomeni di inquinamento marino.

In virtù di questo sistema l'Autorità Marittima è in grado di fornire dati, informazioni, assistenza e servizi idonei a **mantenere la sicurezza nei porti** e nelle acque territoriali ed extraterritoriali di interesse dello Stato. Tali obiettivi sono perseguiti tramite il monitoraggio continuo delle zone di mare interessate, grazie all'utilizzo di particolari attrezzature radar, radiogoniometri, ricetrasmittitori e telecamere i cui segnali vengono ricevuti dai centri di controllo normalmente ubicati presso le strutture operative delle Capitanerie di Porto.

Tramite il Comando Generale delle Capitanerie di Porto vengono anche svolte attività di polizia tecnico-amministrativa marittima, comprendenti la disciplina della navigazione e la regolamentazione di tutti gli eventi che si verificano negli spazi marittimi soggetti alla sovranità statale, il controllo del traffico marittimo, la manovra delle navi, la sicurezza nei porti, le inchieste sui sinistri marittimi, i collaudi e le ispezioni periodiche dei depositi costieri e di altri impianti potenzialmente pericolosi.

2.3 L' Autorità di Sistema Portuale

Nel considerare il sistema delle infrastrutture portuali un posto di preminente rilievo va riservato alle Autorità di Sistema Portuale (ex Autorità Portuali) il cui ruolo, complesso ed articolato, costituisce il nucleo fondamentale da cui si diparte l'organizzazione portuale.

La legge n. 84/94 ha individuato una serie di porti (e, precisamente, i porti di I e II classe della 2° categoria) in relazione ai quali è contemplata l'istituzione di Autorità di Sistema Portuale, ente dotato di personalità giuridica di diritto pubblico e soggetto a vigilanza ministeriale. [8]

A tale ente sono state attribuite numerose funzioni, alcune delle quali in precedenza svolte dall'Autorità Marittima (che, peraltro, negli altri porti minori continua ad operare in esclusiva), tra cui si possono in via generale ricordare principalmente le seguenti:

- a) indirizzo, programmazione, coordinamento, promozione e controllo delle operazioni portuali e delle altre attività commerciali ed industriali esercitate nei porti, con poteri di regolamentazione e di ordinanza, anche in riferimento alla sicurezza rispetto a rischi connessi a tali attività. In particolare la pianificazione e redazione della "Programmazione e realizzazione delle opere portuali. Piano regolatore di sistema portuale e piano regolatore portuale" (cfr. art.6 l. 84/94).

- b) manutenzione ordinaria e straordinaria delle parti comuni nell'ambito portuale, ivi compreso il mantenimento dei fondali.
- c) affidamento e controllo delle attività dirette alla fornitura agli utenti a titolo oneroso di servizi di interesse generale, non coincidenti, né strettamente connessi alle operazioni portuali.

2.4 Codici e regolamenti

Codice della Navigazione e **Regolamento di sicurezza e dei servizi marittimi dei Porti** (consultabili sui siti dell'Autorità Portuale) sono alla base delle attività per il controllo della sicurezza sia a livello delle infrastrutture, sia a livello di procedure che di evoluzione che, come visto, risultano di competenza dell'Autorità Portuale e dell'Autorità Marittima secondo i limiti operativi e normativi istituzionali.

2.5 Vigilanza e controllo

Il compito, pertanto, di garantire l'applicazione ed il rispetto del Codice della Navigazione e del Regolamento Portuale risulta in capo agli organi preposti (Autorità Portuale ed Autorità Marittima) che solo attraverso un'azione di monitoraggio, condivisione delle informazioni e sorveglianza attiva e costante delle figure coinvolte (armatori, comandanti, piloti, rimorchiatori) può minimizzare ed addirittura rendere impossibile il realizzarsi di eventi incidentali. Concetti sostanziali che sono alla base della **Gestione della Sicurezza** in ogni ambito portuale. Non ultimo si vuole evidenziare il ruolo dei Piloti e dei Rimorchiatori nell'ambito dell'attuazione in sicurezza delle modalità operative definite dai Regolamenti e definiti anche "custodi della sicurezza" all'interno del Porto in relazione alla conoscenza delle specificità ad esso connessi con i relativi "rischi" presenti.

Concetto, peraltro, di conoscenza e professionalità già ripreso a conclusione della Linea Guida dell'Inail del 2018 **Gli infortuni dei lavoratori del mare**. [6]

Indipendentemente dai rischi specifici connessi alle attività portuali, vi sono alcuni rischi 'trasversali' cui sono esposti sia i lavoratori che i passeggeri, quali ad esempio: collisione, naufragio e incendio. Tale fattispecie di rischi attiene alla disciplina della sicurezza della navigazione.

L'area tematica della sicurezza della navigazione ha notevoli collegamenti con la prevenzione e la sicurezza del lavoro. La presenza di questi rischi nelle navi è l'elemento costitutivo stesso dei compiti del comandante, dei profili professionali marittimi, dell'organizzazione del lavoro a bordo, della costituzione degli equipaggi, della definizione di percorsi abilitanti di formazione e addestramento, oltre che dell'organizzazione di un sistema articolato di gestione delle emergenze e di un complesso sistema di controlli pubblici esercitati sulle navi ai fini della sicurezza della navigazione.

3. Il terminal petrolifero di Napoli

3.1 Descrizione

La Darsena Petroli (DP) del porto di Napoli si trova in zona Vigliena nell'area orientale di Napoli. L'area, in concessione, è destinata al traffico dei prodotti petroliferi (gasoli, benzine, jet fuel, oli combustibili). Ogni anno su quest'area si movimentano oltre 3 milioni di tonnellate di prodotti destinati all'approvvigionamento energetico, prevalentemente, del Sud Italia.

L'attività del terminal si sviluppa su due segmenti: il principale riguarda il trasferimento dalle navi cisterna, attraverso un oleodotto di 23 linee e lungo circa 4 km, dei prodotti petroliferi e GPL alle aree dei Depositi fiscali; un secondo, il trasferimento di olio combustibile e gasolio, alle "bettoline" per il rifornimento di traghetti, aliscafi, navi da crociera, portacontainer presenti negli scali di Napoli e Salerno.

In zone limitrofe ma non direttamente nell'ambito portuale sono localizzati i Depositi Fiscali delle aziende utilizzatrici del terminal stesso.

L'area della DP è oggetto di progetti di ampliamento e di migliorie attraverso proposte di dragaggio delle banchine anche per poter accogliere navi da 100 mila ton. (contro la media attuale di 30 mila ton.) e contribuire in maniera significativa alla riduzione delle emissioni inquinanti grazie al minor numero di viaggi-nave.



Figura 2. Napoli: Fase di scarico da nave cisterna GPL al pontile PO 68 della DP. [12]

Il particolare il consorzio degli operatori GPL Napoli è composto da 4 società: Energas, Petrolchimica partenopea, Italcost e Eni. Da circa 80 anni sono presenti nell'area orientale di Napoli e dal 1990-1991 gestiscono in concessione il pontile n. PO68 dove attraccano le navi cisterna e da dove, attraverso un reticolo di condotte, il GPL viene trasferito nei Depositi posti a pochi km dalla banchina.

Ognuna delle società ha un proprio Deposito fiscale.

Per il GPL il porto di Napoli si conferma scalo strategico anche per la movimentazione, lo stoccaggio e la distribuzione del GPL nell'Italia centro meridionale e in parte anche del Nord Italia. Anche in questo ambito sono previsti

ampliamenti ed investimenti dei pontili in concessione al fine di far fronte alle maggiori richieste del mercato.

Progetti futuri riguardano il settore del traffico energetico che sta andando incontro a cambiamenti significativi e che riguardano, in particolare, la realizzazione, nel porto di Napoli, nell'area della Darsena Petroli, di un impianto costiero Small Scale di GNL con una capacità complessiva di stoccaggio pari a circa 24.000 m³ dedicato sia all'approvvigionamento dei mezzi navali sia alla distribuzione sulla rete carburanti stradale per i veicoli pesanti. Il progetto è stato già presentato da alcune aziende al Ministero dello Sviluppo Economico, di recente si è conclusa con esito positivo la Conferenza dei Servizi preliminare, ed è in corso l'esame pubblico del progetto per l'ottenimento della concessione. La costruzione dell'infrastruttura è, comunque, subordinata alla definizione con esito favorevole dell'iter amministrativo finalizzato all'ottenimento delle necessarie autorizzazioni. [8]

3.2 Il rischio da urti nelle strutture portuali

"470 urti in cinque anni". Questo il dato riportato sul sito **"Port Crash"** [5] che continua: "Questo l'impressionante numero di urti di navi contro le banchine dei porti italiani o di navi battenti bandiera italiana nei porti esteri in 5 anni. Collisioni talora con navi ormeggiate in banchina ma specialmente scontri con le banchine stesse, talora con effetti marginali che non hanno impedito alle unità mercantili, ai traghetti o alle navi passeggeri di ripartire e riprendere il mare aperto. Talora con conseguenze drammatiche e talora risolti con una semplice riparazione delle lamiere danneggiate nonostante che la nave avesse superato ampiamente la frontiera invisibile che separa il rischio ordinario da una tragedia"

E questa analisi numerica, puntuale e dettagliata, questo racconto degli eventi tragici e dei mancati incidenti deve far riflettere sulla "sensibilità" e della "vulnerabilità" delle strutture poste sulle banchine portuali e degli effetti indiretti dovuti ad eventuali urti o crolli delle strutture stesse e degli impianti e strutture accessorie limitrofe.

Una problematica evidenziata anche da un rapporto del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti sui sinistri marittimi nelle acque territoriali e nei porti italiani nel quale è riportata una forte crescita degli urti contro oggetti fissi (**in particolare banchine**) e un andamento sostanzialmente stazionario delle collisioni, ovvero degli urti fra navi.

E dall'analisi della genesi dei sinistri più frequentemente individuati dalle inchieste effettuate dalle Autorità marittime, come riportato dal sito "Port Crash" emerge come il primo posto tra le cause di incidenti sia dovuta al fattore umano con un'incidenza variabile tra il 46% ed il 51% dei casi. L'ambiente esterno, inteso come condizioni meteo-marine o anche fattori ambientali alla nave è rilevato come causa principale tra il 17% ed il 22% dei casi

Dati che seppure confermino l'ipotesi che **urti e collisioni** nei porti sono quasi ordinaria amministrazione, non avendo neppure rilevanza assicurativa,

rappresentano invece da un punto di vista di rischio indiretto una condizione non accettabile in considerazione della tipologia di strutture e di impianti oggetto del presente studio.

Tra le cause, a monte, gli specchi acquei e gli spazi di manovra che molte volte tendono a ridursi, esponendo pertanto a rischio da urti le strutture portuali preesistenti come accaduto nel caso della Torre Piloti del Porto di Genova, crollata proprio a seguito di urto di una nave in fase di manovra nell'area antistante conseguente ad un mancato funzionamento degli strumenti di bordo (mancato avvio del motore).

Ed anche la costruzione di nuove banchine e di terminal specializzati spesso ricavati dal riempimento di specchi acquei esistenti è la regola non l'eccezione.

Numerosi i casi che hanno visto il coinvolgimento di strutture portuali nell'ultimo decennio e che rientrano nella tipologia di valutazioni oggetto del presente studio.

Nel maggio del 2017 una manovra errata è stata probabilmente la causa dell'incidente che ha visto protagonista la nave General cargo Dazhi nel porto ivoriano di Abidjan.

La nave è andata a sbattere contro il terminal container colpendo una delle gru, che si è piegata su sé stessa, fortunatamente senza provocare feriti.

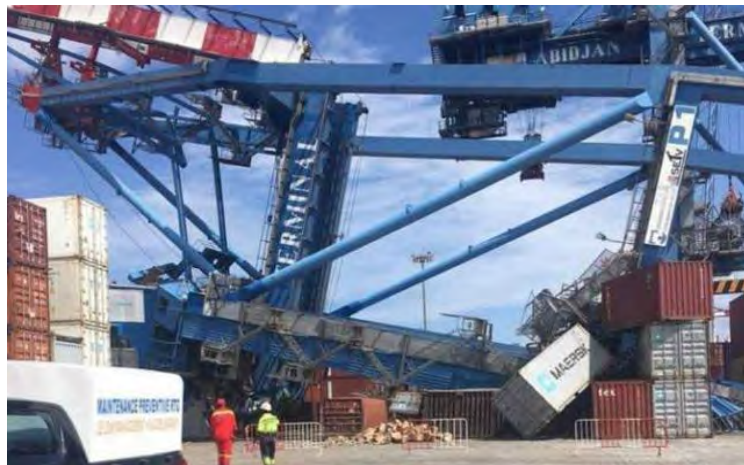


Figura 3. Abidjan: Gru a portale crollata a seguito di urto (dal sito Port Crash)

Ed ancora più eclatante, in termini di "rischio indiretto", l'evento del maggio 2016 della porta container cinese "Cosco Hope" che ha innescato una vera e propria reazione a catena a Port Said in Egitto. La nave, infatti, ha urtato in manovra e fatto crollare una gru che è precipitata su una pila di container che hanno preso fuoco. Due feriti e danni ingentissimi il bilancio.

Una collisione sempre a maggio 2016 si è invece verificata in rotta per il porto di Ningbao, in Cina, fra due portacontainer, la Sanfmarine Meru e la Northern Jasper. Anche in questo caso alla collisione ha fatto seguito un incendio.

Ed infine, e non ultimo, nel novembre del 2018 un traghetto della compagnia genovese Gnv, l'Excellent, ha urtato una gru nel porto di Barcellona. L'impatto ha

provocato l'incendio della stessa gru e di quattro container. Non ci sono stati feriti, né tra il personale di bordo né tra quello di terra.



Figura 4. Napoli: Darsena Petroli a ciglio banchina e sullo sfondo Gru Portuali [11]

È pertanto evidente che i *port crash* sono e continueranno ad essere parte integrante dell'attività dei maggiori scali marittimi del mondo e pertanto non è possibile sottovalutare i rischi indiretti connessi ad eventuali incidenti

3.3 La movimentazione del GPL nella Darsena Petroli

Come già descritto in premessa la Darsena Petroli del porto di Napoli è interessata da accosti differenziati per la movimentazione di idrocarburi liquidi, per il bunkeraggio e per la movimentazione di GPL. [4]

L' accosto per le navi gasiere è identificato con la sigla PO68 ed è ubicato in prossimità della Calata Progresso tra il Molo Vigliena e il Molo Progresso.

Le operazioni di movimentazione degli idrocarburi liquidi e del GPL riguardano prevalentemente la scarica nave verso i depositi costieri dell'area orientale di Napoli e vengono eseguite con le sole attrezzature nave in quanto, in ambito Darsena Portuale, non vi sono né stazioni di rilancio né impianti di riscaldamento dei prodotti ma esclusivamente tubazioni e relativi accessori.

| LINEA/SIZE | UTENTE | SERVIZIO | PERCORSO |
|---------------|----------------------|----------|---|
| AG1/6" | Eni SpA Divisone R&M | GPL | Da Darsena Petroli a Eni SpA Divisone R&M |
| AG2/6" | Eni SpA Divisone R&M | GPL | Da Darsena Petroli a Eni SpA Divisone R&M |
| I1/6" | Italcost | GPL | Da Darsena Petroli a Italcost |
| I2/10" | Italcost | GPL | Da Darsena Petroli a Italcost |
| PP1/6" | Petrochimica | GPL | Da Darsena Petroli a Petrochimica |
| PP2/8" | Petrochimica | GPL | Da Darsena Petroli a Petrochimica |
| CL1/6" | Energas | GPL | Da Darsena Petroli a Energas |
| CL2/8" | Energas | GPL | Da Darsena Petroli a Energas |

Figura 5. Elenco gasdotti in partenza dal PO 68 [4]

Le operazioni di movimentazione del GPL avvengono utilizzando i circuiti tubazioni e avviate ai gasdotti che collegano il PO 68 con i relativi depositi costieri di GPL della Zona Orientale di Napoli.

Le operazioni di **discarica nave** sono le operazioni prevalenti al PO 68.

Il GPL in fase liquida è movimentato (inviato ai depositi) a mezzo delle pompe della nave gasiera ormeggiata al PO68. Nel caso in cui la movimentazione interessi il GPL in stato semi-refrigerato/refrigerato, è la stessa nave gasiera ad assicurare una temperatura del GPL al manifold non inferiore a 0° C. La portata di discarica è mediamente di 200 t/h. L'operazione di discarica nave gasiera avviene collegando il braccio rigido del PO68 al manifold della nave gasiera (fase liquida). Il trasferimento del GPL, dalla nave ai depositi costieri dei membri del consorzio, è normalmente effettuato, con esclusione dell'Italcost, utilizzando in parallelo i n. 2 gasdotti della singola società. A fine operazioni di discarica del GPL in fase liquida, la nave gasiera provvede a spazzare i gasdotti utilizzando GPL gassoso. A tal proposito, analogamente alla movimentazione del GPL in fase liquida, sono utilizzati i compressori della nave gasiera. Solo in casi eccezionali, per fuori servizio e/o manutenzione del braccio rigido, le operazioni di discarica nave gasiera avvengono con manichetta flessibile.



Figura 6. Strutture di carico e antincendio poste sul ciglio banchina della DP [11]

L'operazione di **caricazione nave** è sporadica; la caricazione del GPL fase liquida, movimentato a mezzo delle pompe del deposito speditore, avviene utilizzando la manichetta flessibile per il collegamento con il manifold fase liquida della nave gasiera. In tal caso il braccio rigido è collegato al manifold della nave gasiera fase gas svolgendo la funzione di linea di ritorno per la fase gas. Pertanto, per tale tipologia di attività, un gasdotto è utilizzato per il trasferimento del GPL in fase liquida ed un altro per il ritorno fase gas caricazione nave gasiera semi-refrigerata: in tal caso il layout circuitale è identico a quanto descritto al punto precedente, ad eccezione del braccio rigido che, comunque collegato al manifold fase vapore della nave gasiera, è lasciato intercettato. In caso di sovrappressione nei serbatoi riceventi della nave gasiera la linea di ritorno fase vapore viene aperta, previa verifica che la pressione dei serbatoi del deposito sia inferiore alla pressione dei serbatoi nave.



Figura 7. Collettore distribuzione ai gasdotti dal PO 68 per i Depositi Fiscali [11]

Per l'operazione di carica della nave gasiera refrigerata in tal caso l'operazione di carica della nave gasiera avviene utilizzando esclusivamente la manichetta flessibile per il GPL in fase liquida, senza collegare il braccio rigido per il ritorno della fase vapore. Il braccio rigido è pertanto lasciato intercettato e in condizione di riposo.

Ove necessario il raffreddamento del GPL è effettuato attraverso gli impianti di bordo dal personale navigante.

Infine, al PO 68 è installato un gruppo di **Odorizzazione** del GPL.

L'odorizzante (TBM) è detenuto in fusti e da questi aspirato da pompe dosatrici per la successiva immissione in linea. La portata di odorizzante è calcolata dal sistema di misura del gruppo di odorizzazione, risultando proporzionale alla portata del GPL in fase liquida in scarica, al fine di additivare il GPL in conformità alle normative vigenti.

4. L'organizzazione della prevenzione incendi in ambito portuale

I porti nascono con la funzione di consentire il carico e lo scarico di merci e lo sbarco e l'imbarco di passeggeri, da sempre sono fonti di scambi commerciali e crocevia di comunicazioni. [2]

La complessità di operare la prevenzione incendi in un porto è data da questo continuo mutamento, caratterizzata da traffici di merci deperibili, prodotti forestali, merci rinfuse liquide, solide, merci pericolose, prodotti petroliferi e container.

La gestione delle emergenze per incendi è un sistema complesso caratterizzato da:

- aperture in continuo scambio con l'esterno e con altri sistemi
- poca consapevolezza di ogni componente del comportamento del sistema e scarsa conoscenza degli effetti delle proprie azioni sul sistema stesso
- complessità come proprietà emergente del sistema e non delle sue parti

Le attività connesse alla risoluzione di eventi incidentali complessi risultano difficili anche in considerazione dell'immaginazione necessaria per anticipare e visualizzare i rischi potenziali di incendio o di esplosione avendo a che fare con informazioni carenti, mutevoli e dinamiche non lineari.

In virtù di queste caratteristiche la **gestione delle emergenze di incendi** viene considerata un'attività ad alto rischio caratterizzata da elevati livelli di connessione e bassa controllabilità: ciò individua un sistema poco gestibile con necessità di un alto grado di aggiustamento delle prestazioni.

Lo strumento per attuare una tempestiva ed efficace gestione della situazione di emergenza è rappresentato dall'applicazione di un **piano**, il quale dovrà porsi l'obiettivo di consentire agli attori presenti sulla scena portuale di reperire rapidamente informazioni, risorse e procedure.

Inoltre, per le caratteristiche di mutevolezza del contesto portuale accennate in premessa, il piano dovrà al contempo essere uno strumento dinamico soprattutto nell'assestare le evoluzioni e modifiche degli assetti portuali.

Le informazioni utili da elaborare e rendere disponibili o facilmente reperibili sono costituite da tutti quegli elementi che consentono agli operatori impegnati nella

gestione dell'emergenza di conoscere le caratteristiche e le peculiarità dell'area interessata dall'evento. A tal fine le informazioni dovranno cercare di definire un completo quadro conoscitivo dell'area portuale in ambito generale e di dettaglio. Dal punto di vista generale la prevenzione incendi nel porto deve richiamare e coordinarsi con gli altri strumenti di pianificazione inerenti la struttura portuale e le realtà industriali ivi insediate, come:

- Piani di protezione civile a livello locale;
- Rapporto Integrato di Sicurezza Portuale;
- Piano di sicurezza portuale (security plan);
- Piani di emergenza esterna per gli stabilimenti a rischio d'incidente rilevante;
- Piani antinquinamento;
- Disposizioni emanate dall'autorità competente - ordinanze della Capitaneria di Porto e dell'Autorità Portuale (es. ordinanze relative alle merci pericolose);
- Piani di emergenza interni predisposti dai singoli terminalisti, aerostazioni, stazioni marittime, cantieri e/o navigli;

individuando, al contempo, le strutture, gli enti, le amministrazioni, le organizzazioni e i gestori dei servizi pubblici e privati che partecipano alla gestione delle emergenze e citare le normative nazionali e locali di riferimento.

Ai fini dell'individuazione delle informazioni di dettaglio operativamente si è constatato che risulta una ottima soluzione suddividere i bacini portuali in "macro-zone omogenee" dal punto di vista del rischio incendio in base alle caratteristiche funzionali che a loro volta sono successivamente suddivise in zone minori.

Questo processo è facilitato dal normale lay-out caratteristico dei porti distribuito in base ai ponti e alle calate e alla tendenza gestionale ad assegnare aree limitrofe a concessionari con caratteristiche simili.

Per ciascuna zona sarà necessario predisporre una mappa e una scheda informativa contenente i dati di rilievo relativi come per esempio:

- accessi e le loro caratteristiche
- tipologia di ormeggi
- ubicazione
- tipologia di unità che scalano le banchine
- piazzali e fabbricati retrostanti
- impianti tecnologici presenti in zona
- natura prevalente dei traffici marittimi
- presenza e collocazione di dotazioni antincendio pubbliche e private
- mezzi operativi
- presenza di merci classificate pericolose
- aree e depositi sensibili
- concessionari presenti, nonché le persone ed enti chiave che possono fornire informazioni utili in merito a ciascuno degli aspetti evidenziati.

Operare secondo una siffatta strategia di prevenzione incendi risulta computazionalmente onerosa; maggiore sarà il grado di dettaglio con cui la si

implementa, maggiori saranno le informazioni che se ne potranno trarre; per contro sarà più difficoltoso mantenerla aggiornata in relazione alle modifiche organizzative e commerciali.

Le tipologie di scenari incidentali ipotizzabili nell'area portuale risultano riconducibili a:

- eventi in porto
- eventi a bordo (nave ormeggiata, in navigazione o in rada).

Nell'analisi necessaria ad individuare altre tipologie di scenari, contestualizzate alle specifiche prerogative del porto, risulta sicuramente utile considerare anche gli scenari incidentali relativi alla movimentazione di merci pericolose. Tramite gli scenari di riferimento si potrà procedere all'individuazione del modello d'intervento adeguato.

Ulteriore aspetto da evidenziare sono le risorse disponibili, in termini di uomini, materiali e mezzi, sia riconducibili ad autorità ed enti di rilevanza pubblica, sia a soggetti privati che, seppur con diverso grado di specializzazione, possono fornire un utile e qualificato contributo nella gestione delle diverse situazioni di emergenza.

A tal fine risulta utile effettuare una distinzione tra "**risorse primarie**" e "**risorse correlate**".

Le prime, le **risorse primarie**, comprendono enti ed autorità pubbliche aventi finalità di rilievo nella gestione e risoluzione dell'emergenza (Capitaneria di Porto/Guardia Costiera, Corpo Nazionale dei Vigili del fuoco, Aziende Sanitarie Locali - Servizio Emergenza Sanitaria Territoriale, Prefetture/Uffici Territoriali del Governo), le seconde, le **risorse secondarie**, risultano composte da tutti i soggetti che a vario titolo assumono particolare rilevanza ed utilità alla risoluzione della situazione (dall'Autorità Portuale, alla Sanità Marittima).

Per la catena di comando, la legge 690/1940 attribuisce la direzione dei soccorsi ed il coordinamento delle risorse disponibili al Comandante del Porto, mentre affida al Comandante Provinciale dei Vigili del fuoco, la direzione e la responsabilità tecnica dell'impiego dei mezzi e degli uomini delle squadre di intervento.

L'esperienza sino ad oggi maturata porta a considerare che la struttura di gestione da adottare è **evento-dipendente**, dovrà cioè essere flessibile per adattarsi alla situazione contingente (lieve, grave, gravissima), per la cui risoluzione, soprattutto in caso di eventi incidentali complessi, risulta necessario il contributo di molteplici e differenti risorse.

Il sistema, a prescindere dalle denominazioni in uso, che maggiormente si avvicina risulta essere uno schema fisso facilmente scalabile a seconda delle necessità, basato sull'ampia partecipazione in tre livelli di gestione: strategico, tattico ed operativo.

Il **livello strategico**, a cui faranno capo le risorse primarie integrate secondo le specifiche necessità, avrà il compito di individuare la strategia per fronteggiare l'evento.

Il **livello tattico**, situato nei pressi dell'evento, ha invece lo scopo di pianificare al meglio le singole azioni dei Vigili del Fuoco.

Il **livello operativo** vedrà gli operatori impegnati nello svolgimento delle azioni secondo le procedure stabilite e/o elaborate, e nell'ambito della propria competenza.

Per ciascun possibile evento incidentale individuato dovranno essere predisposte delle procedure operative con l'obiettivo principale di pianificare preventivamente la successione delle azioni ed interventi tecnici e di soccorso che devono essere intrapresi per far fronte all'evento, sulla base della catena di comando e del sistema di allertamento adottati.

Attraverso le procedure è possibile anche volgere a proprio favore le peculiari risorse dell'area portuale.

Sotto questo aspetto, è risultata efficace nei principali porti una procedura per l'accompagnamento dei mezzi di soccorso diretti in ambito portuale, basata sulla presenza 24 ore su 24 del personale del Servizio di Vigilanza presente ai varchi, il quale scorta i mezzi di soccorso sul luogo dell'evento.

Ciò consente di usufruire della capillare conoscenza degli ambiti portuali del personale del servizio di vigilanza sopperendo ad eventuali variazioni degli elementi informativi presenti nel piano.

Le esperienze vissute nei porti italiani indicano che tra Capitaneria di Porto, Vigili del fuoco, le società di Guardia Fuochi, i consulenti chimici del porto sono presenti sinergie consolidate che in situazioni di emergenza si sono rivelate più di una volta vincenti.

Tutti gli elementi sin ora visti devono mantenere la propria efficacia nei confronti della metamorfosi spesso consistente che può subire l'area portuale; quindi, caratteristica intrinseca del documento deve essere la dinamicità e l'adattabilità ai mutamenti.

A tal fine risulta sensato predisporre già dalle fasi di prima elaborazione il documento in versione digitale su piattaforma web, sfruttando le potenzialità dei collegamenti ipertestuali in modo da ottenere con semplicità e rapidità le informazioni desiderate. Ciò consente di aggiornare esclusivamente le parti di interesse, lasciando inalterato l'impostazione del documento. Quest'ultime avranno necessità di revisione nel caso di variazioni che comportino un aggravio di rischio incendio dell'area operativa portuale.

5. Conclusioni

Il principio dell'affidabilità è alla base di tutte le attività operative e lavorative.

Ma la prevedibilità e la gestione di eventi infortunistici è alla base di tutti i processi di valutazione dei rischi e di programmazione delle attività di mantenimento delle procedure di sicurezza e delle attività di intervento in emergenza.

La gestione sinergica delle attività con l'ausilio di sofisticati centri di controllo del traffico marittimo posti a sorveglianza di acque nelle quali si incrociano

quotidianamente navi mercantili, porta-container, traghetti, navi da crociera, unità di diporto è alla base di ogni attività di controllo in ambito portuale.

Una realtà, quella portuale, caratterizzata da professionalità altissime, da una capacità di gestione particolarmente sofisticata caratterizzata per quanto riguarda in particolare dal Corpo delle Capitanerie di porto, dall'adozione di tecnologie sempre più avanzate di Vessel Traffic System (VTS).

E proprio l'evoluzione dei VTS e dei sistemi di controllo sul traffico marittimo ha determinato negli ultimi anni un sensibile innalzamento dei livelli di sicurezza pur in presenza di specchi acquei portuali sempre più dimensionalmente ridotti, di un generale incremento dimensionale delle navi e di crescite significative del traffico.

Tuttavia, la "fallibilità" dei sistemi e delle persone non è da escludere

Ed il caso assunto quale riferimento in questo lavoro quale il crollo della Torre Piloti di Genova e la morte di 9 persone, rappresenta l'esempio, fortunatamente più unico che raro di **fallibilità contemporanea** di uomini, mezzi e procedure. [1]

Ed è per questo che il livello di attenzione non può calare in ambito portuale in presenza di diverse e limitrofe attività "**pericolose**" per le quali **solo**:

- un'attenta professionalità nello svolgimento dei singoli incarichi degli operatori
- un'elevata informazione e condivisione delle informazioni e dei rischi
- un monitoraggio dei sistemi di sicurezza
- la predisposizione di sistemi di controllo
- la predisposizione di sistemi di allarme
- la elaborazione di procedure e di piano di emergenza
- il coordinamento delle istituzioni (INAIL/ASL/VVF/AP/AM/Prefettura/ecc.)

rendono eventi infortunistici quali l'incendio e l'esplosione "**improbabili seppur prevedibili**".

E pertanto il principio dell'affidabilità non può non tener conto di fattori quali

- la professionalità del comandante della nave e del personale della stessa altamente qualificato per la specificità della mansione
- la funzionalità delle attrezzature presenti sulla nave per il controllo di eventuali anomalie
- il rispetto delle procedure e dei regolamenti definiti per ridurre ed eliminare ogni rischio
- il controllo e la vigilanza sulle corrette procedure
- la presenza di procedure di allarme e di emergenza
- il rispetto delle procedure di allarme in caso di emergenza

Tutti elementi purtroppo venuti meno nel caso del crollo della Torre Piloti del Porto di Genova.

6 Bibliografia

[1] Atti del processo di Genova relativi al crollo della Torre Piloti di Genova (Consulente di parte Ing. Carmine Piccolo)

[2] M.M. La Veglia, C. Piccolo. *Corso di Retraining ed aggiornamento dei Caposquadra dei Vigili del Fuoco*. Dalle lezioni in veste di docenti al Corso di Formazione, Polo Didattico di Napoli, Anno 2015 (dispense non pubblicate ad esclusivo uso didattico interno).

[3] M.M. La Veglia *Manovre e tecniche di addestramento pompieristico di base per interventi in porto*. Dalle lezioni in veste di Direttore del Corso di Formazione, Polo didattico di Napoli, Anno 2017 (dispense non pubblicate ad esclusivo uso didattico interno)

[4] J. Pardi. RSPP Energas s.p.a. Documento di valutazione di rischi e Piano di emergenza della Darsena Petroli

[5] <https://www.portcrash.net> - Collisioni in acque portuali

[6] Inail – Infortuni dei lavoratori del mare Anno 2018

[7] <https://www.giureta.unipa.it/2009/boi.pdf>

[8] <https://adsptirrenocentrale.it/porto-di-napoli-strategico-per-lapprovvigionamento-energetico-per-il-sud-e-il-centro-italia/>

[9] Legge 28 gennaio 1994, n. 84, e successive modificazioni

[10] <https://www.napoli.energy/porto>

[11] Foto dell' autore Ing. Carmine Piccolo

[12] Foto di proprietà di Energas s.p.a.

Valutazione di analisi post incidentali in occasione di ispezioni del Sistema di Gestione della Sicurezza

C. Delle Site¹, E. Artenio¹, I. Mazzarelli²

¹inail - Dit

²inail - Uot di Milano

Abstract

A seguito di un evento occorso in uno stabilimento chimico e della conseguente analisi post incidentale effettuata dal Gestore, la Commissione incaricata dell'ispezione del Sistema di Gestione della Sicurezza ai sensi del 27 del D.Lgs 105/15^[1] ha condotto un esame accurato delle valutazioni conclusive di tale analisi.

La memoria si propone di descrivere un esame critico con riferimento alla corretta analisi delle cause di radice, alla sicurezza di processo ed ai sistemi di protezione, alle procedure gestionali ed operative coinvolte nella sequenza dell'evento, all'assicurazione delle fonti di prova.

In conclusione, verranno evidenziate le criticità riscontrate, in particolare riguardo la corretta applicazione di procedure operative e gestionali, la necessità di migliorare le capacità di analisi degli eventi nelle organizzazioni aziendali, l'adozione di soluzioni adeguate in base all'esperienza operativa, la corretta applicazione dei processi di comunicazione.

Keywords: Direttiva Seveso, evento incidentale, Root cause analysis, Ishikawa, analisi del rischio.

1. L'evento incidentale

Al termine di una ispezione ordinaria ai sensi dell'art. 27 del D.Lgs 105/15 condotta su uno stabilimento chimico di soglia superiore, immediatamente prima che la Commissione ispettiva trasmettesse il rapporto conclusivo al Comitato Tecnico Regionale, nella tarda serata di un giorno festivo accadeva un evento incidentale non classificato come incidente rilevante e non rientrante tra i top event valutati dal Gestore, in quanto la sostanza coinvolta non rientrava tra quelle individuate nell'allegato 1 – parti 1 e 2 – del D.Lgs 105/15.

L'evento si è manifestato come rilascio di una nube di vapori provenienti da un camino di stabilimento posto a quota di 25 mt d'altezza, che ha raggiunto la distanza di circa 1,4 km dal punto di emissione nella direzione del vento, formando un cono di emissione sull'abitato, con conseguenti odori percepiti dalla popolazione.

Le cronache locali riportavano le azioni immediate delle autorità e gli esiti rassicuranti della verifica ispettiva straordinaria dell'ARPA; infatti, si trattava di vapori irritanti senza alcuna conseguenza per la popolazione e per l'ambiente.

La Commissione incaricata dell'ispezione ordinaria di cui all'art. 27 procedeva ad effettuare un ulteriore sopralluogo al fine di accertare le cause dell'evento e la corretta applicazione delle procedure gestionali prima, durante e dopo l'evento.

Si appurava dalla scheda di sicurezza che la sostanza coinvolta era un monomero con le seguenti caratteristiche e frasi di rischio: irritazione cutanea, 2, H315, sensibilizzazione cutanea, 1, H317, tossicità specifica per organi bersaglio - esposizione singola, 3, H335 (irritazione delle vie respiratorie), poco nocivo per inalazione uomo, nocivo per gli organismi acquatici. Tali caratteristiche confermavano le conclusioni dell'ARPA. Gli effetti della sostanza sull'ambiente sono: nocivo per la dafnia (indicatore biologico), poco bioaccumulabile, valutazione PBT e vPvB non considerata persistente, né bioaccumulabile, né tossica (PBT), né molto persistente e molto bioaccumulabile (vPvB).

Con riferimento alla figura 1, che mostra le sezioni di impianto coinvolte, si riporta la sequenza dell'evento, desunta dal rapporto post incidentale del Gestore e che è stata oggetto di approfondimento della Commissione.

Il reattore R in figura era stato escluso dal processo e la manichetta MAN era stata posta verso lo scarico nella vasca di emergenza; mentre si svolgeva la produzione su altri reattori gli stessi mostravano profili termodinamici e cinetici irregolari, gli operatori appuravano che la quantità di reagenti inviata ai reattori si discostava da quella desiderata e pertanto deducevano verosimilmente che una parte di reagenti era fluita non volutamente verso la valvola 1, presumibilmente chiusa, e quindi verso la vasca di emergenza VA dedicata all'invio di prodotti di cattiva qualità o mal reagiti (fuori specifica) attraverso lo scarico di fondo dei reattori. Gli scarichi dei reattori in alcuni casi vengono inviati alla fogna polimerica di reparto non rappresentata in figura.

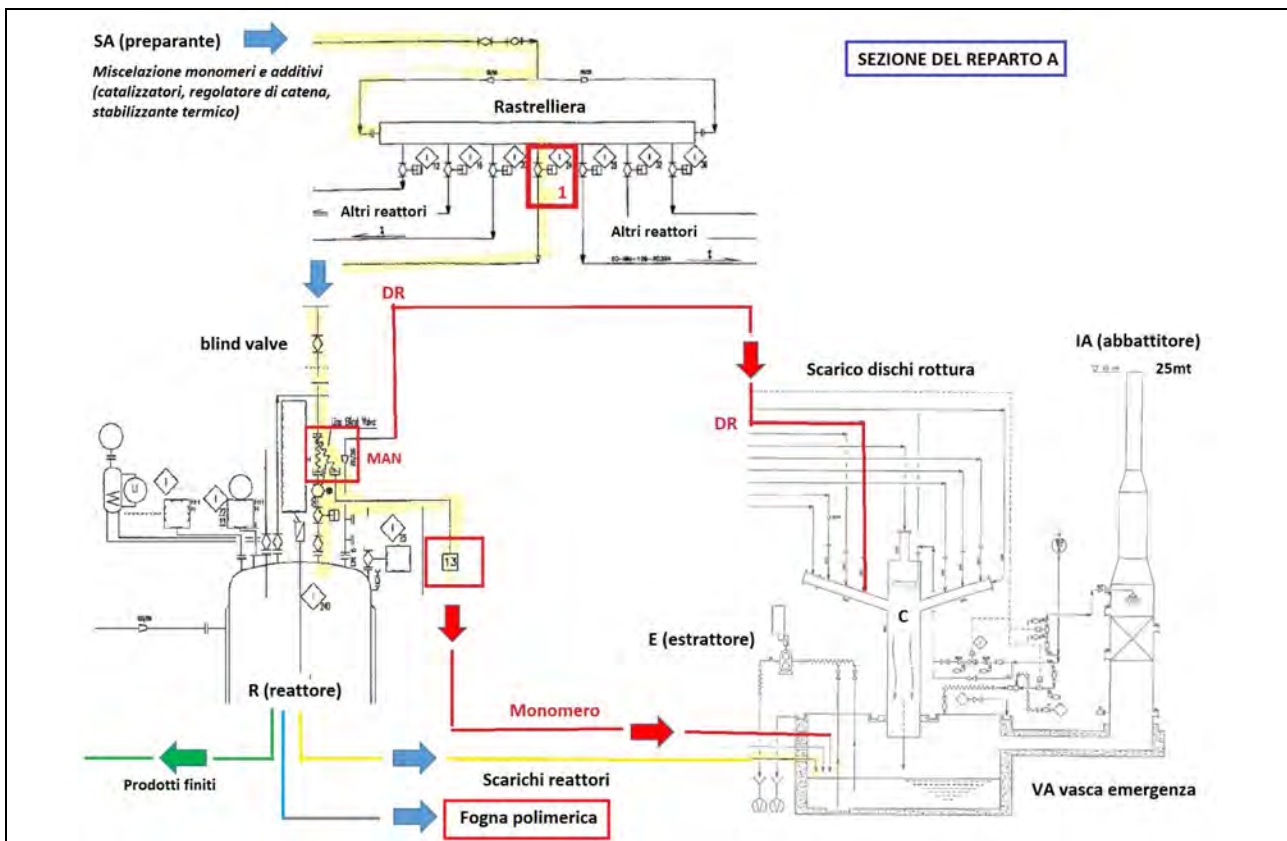


Figura 1. Schema sintetico del ciclo di reazione e scarico reattori

Accertata la quantità pervenuta nella vasca, si metteva in atto una procedura di inibizione mediante miscelazione con sostanza dedicata immessa nella vasca, ciò in attesa di gestire il quantitativo come rifiuto da far prelevare secondo le norme vigenti in materia, cioè successivamente alla sua caratterizzazione e quantificazione. Le operazioni di controllo dovevano garantire che il monomero non reagisse spontaneamente (polimerizzazione autosostenuta per mancata inibizione), tuttavia in un giorno festivo, a seguito anche di cambi turni, che comportavano il mancato controllo della reattività spontanea, la sostanza reagiva ed il mancato azionamento dell'impianto di abbattimento (di tipo non automatico) faceva sì da generare la nube descritta.

2. L'analisi del Gestore e le misure di protezione e prevenzione

Il team incaricato dal Gestore (composto solo da personale interno dello Stabilimento) ha stilato un report post incidentale dal quale si evince l'evoluzione temporale più o meno accurata dei fatti che hanno condotto all'evento finale, nonché le cause ritenute pertinenti come di seguito indicate:

- ✓ mancata indicazione a tutti gli operatori dell'intervento richiesto il lunedì ed il martedì antecedente l'evento con sostituzione del corpo valvola (posizione 1) all'interno del reparto A;
- ✓ mancata indicazione dello stato dell'impianto nel passaggio di consegne del reparto A al reparto B reperibile il venerdì;

✓ mancata indicazione di comunicazione tra i reparti A e B relativamente alle azioni di controllo/mitigazione in atto ed alla presenza di monomero all'interno della vasca di blow-down tra il lunedì ed il venerdì antecedenti la domenica dell'evento; La suddetta analisi elenca in maniera non esaustiva le cause singole o comuni che hanno condotto all'evento, ma non è presente una valutazione reale della causa "radice", non descrive puntualmente tutte le fasi dell'evento in relazione ai fattori gestionali ed è principalmente mirata a definire nell'immediato carenze di impianto o gestionali, al fine di adottare azioni immediate. Infatti, riporta le seguenti ulteriori cause:

- a) un sistema di miscelazione all'interno della vasca di blow-down che ha indotto una inibizione inefficiente della reazione;
- b) l'assenza di una procedura standard di immissione diretta dal miscelatore SA alla vasca di blow-down;
- c) l'errato montaggio e valvola 1 guasta dopo intervento di manutenzione;
- d) l'assenza di allarmi in sala controllo;
- e) l'assenza di azioni immediate su reazione di polimerizzazione irregolare;
- f) nessun trattamento immediato dei vapori;
- g) l'assenza di rilevatori di vapori organici;
- h) l'assenza di controllo in continuo durante il fine settimana;
- i) la mancanza di informazioni tra i reparti unità impianto interessati sulle condizioni della vasca di blow-down.

Gli interventi previsti dal Gestore per evitare il ripetersi di un analogo evento incidentale sono di seguito riportati:

- 1) definizione di una procedura specifica per garantire il controllo della vasca, elencando (se necessario) anche in una check list tutte le attività che gli operatori di reparto devono svolgere in caso di emergenza;
- 2) divieto di deviazione dal miscelatore SA alla vasca con conseguente informazione agli operatori di reparto. Tale indicazione appariva in antitesi con quanto riportato al punto precedente;
- 3) modifica del modulo passaggio di consegne tra i reparti A e B e idonea informazione reciproca;
- 4) duplicazione in sala controllo del reparto B dei segnali presenti nella sala del reparto A;
- 5) installazione di idonea strumentazione all'interno della vasca e del relativo camino, antepoendo in particolare una idonea torre di lavaggio al camino;
- 6) studio di una idonea soluzione di dosaggio killer relativamente alla presenza di monomero all'interno della vasca di blow-down;
- 7) installazione all'interno del reparto A di idoneo serbatoio di gas inerte;
- 8) definizione di procedure di prova delle valvole a servizio dei reattori e miglioramento del modulo di prova valvole tipo "1" con test ad acqua;
- 9) riduzione dei tassi di guasto delle valvole tipo "1" a servizio dei reattori.

3. Le attività della Commissione ispettiva

La Commissione, mediante il sopralluogo su impianti ed aree interne allo Stabilimento ed interviste a responsabili ed operatori, si è posta l'obiettivo quindi di:

- acquisire ed analizzare gli atti emessi dal Gestore in applicazione delle procedure del Sistema di Gestione della Sicurezza (SGS);
- accertare l'applicazione della procedura di analisi post-incidentale e le relative conclusioni, ivi inclusa l'applicazione delle misure di protezione immediate, quelle di prevenzione nel tempo, l'assicurazione delle fonti di prova e l'analisi delle cause;
- definire chiaramente la timeline dell'evento e l'analisi critica delle cause al fine di accertare la corretta applicazione di tutte le procedure interessate;
- proporre raccomandazioni e prescrizioni sul SGS.

3.1 Il sopralluogo

La Commissione ha visitato i luoghi principali dello stabilimento coinvolti nell'evento incidentale, in particolare:

- l'area della vasca di emergenza adiacente alla sala controllo del reparto A;
- la sala controllo del reparto A, acquisendo copia del permesso di lavoro relativo alle manutenzioni delle valvole tipo "1" ed ispezionando altresì il sistema di controllo DCS;
- la sezione produttiva del reparto A per visionare la congruità dei P&I e la sezione riferita alle valvole "tipo 1", alla rastrelliera e all'attuale configurazione impiantistica dei reattori (manichette, scarichi di fondo, etc.);
- l'ubicazione e la disponibilità di sostanza inibitrice in loco (sacchi);
- la distanza della sala controllo del reparto B rispetto all'ubicazione della sala controllo del reparto A.

3.2 Le interviste e l'acquisizione dei documenti

La Commissione ha intervistato le figure responsabili e gli addetti alle varie operazioni occorse nei tempi individuati nella timeline ed approfondito alcuni aspetti pertinenti l'evento incidentale, ciò al fine di verificare la corretta applicazione di tutte le procedure gestionali applicabili; in particolare si è posta l'attenzione sulle seguenti procedure di gestione e moduli di registrazione richiamati nelle stesse:

- scheda di sicurezza della sostanza coinvolta;
- manuale operativo reparto A e produzione polimero, P&I connessi;
- istruzioni per la partenza, fermata e controlli reparto A nel fine settimana;
- istruzione controllo periodico linea miscela monomerica;
- eventi non pianificati (sversamenti e rilasci);
- criteri di identificazione degli elementi critici e relativo registro;
- manutenzione;
- lavori svolti da imprese esterne e permesso di lavoro;
- informazione, formazione ed addestramento;

- linee guida per la comunicazione interna ed esterna e registro passaggio consegne;
- non conformità e azioni correttive e preventive;
- sorveglianza e misurazioni;
- investigazione post incidentale;
- scheda analisi esperienza operativa D. Lgs. 105-15, All. H, Sezione 2.

La Commissione acquisiva altresì le fonti di prova e le evidenze della comunicazione dell'evento alla Prefettura ed ai VVF, nonché la relazione di intervento dell'ARPA.

3.3 L'analisi dell'evento nel contesto impiantistico e la timeline

L'attività produttiva svolta all'interno del reparto A può essere scomposta nelle seguenti fasi:

1. Miscelazione di monomeri all'interno del serbatoio SA con additivi (catalizzatori, regolatore di catena e stabilizzante termico) e successivo trasferimento della miscela ai sette reattori R attraverso una apposita rastrelliera (vedi figura 1);
2. Reazione all'interno di reattori dotati di corpo e camicia o serpentini di riscaldamento/raffreddamento, nei quali è già stata precaricata la fase acquosa (costituita da acqua, acqua di riciclo da reazioni e agente sospendente). In essi viene trasferita la miscela monomerica preparata all'interno del serbatoio SA; il reattore viene progressivamente riscaldato fino all'innesco della reazione. A questo punto la camicia del reattore passa alla fase di raffreddamento controllando il calore liberato dalla reazione di polimerizzazione di tipo esotermico, fino al suo completamento (picco termico). Al termine della reazione nel reattore è presente uno slurry di acqua e polimero che viene inviato alla sezione di stoccaggio del prodotto finito (scarico regolare del reattore).

L'impianto si completa con la fase di separazione del polimero dallo slurry, mediante centrifugazione delle perle di polimero, un successivo lavaggio, una nuova fase di centrifuga, l'essiccamento e la vagliatura, per poi terminare con il carico del polimero solido in autosili.

Dall'esame dell'analisi incidentale, dalle interviste, dal sopralluogo ispettivo, nonché dall'analisi delle documentazioni e delle altre evidenze acquisite, si è appurato che il **lunedì mattina** gli operatori del reparto A, in applicazione della procedura di manutenzione, hanno provveduto a richiedere un intervento sulla valvola 1 malfunzionante (evento abbastanza frequente come rilevato nei permessi di lavoro, causa la solidificazione del monomero), si appurava la necessità di sostituzione del corpo valvola.

L'intervento è stato effettuato dalla ditta esterna incaricata il **martedì mattina** e si è completato con una prova della valvola secondo la specifica istruzione operativa.

Il **martedì pomeriggio** il reparto A segnalava nuovamente il malfunzionamento della medesima valvola, che ha previsto una nuova prova funzionale relativa alla corretta corsa dell'otturatore nelle posizioni chiuso/aperto. Non è stata effettuata una prova di tenuta della valvola, ma esclusivamente una prova con azoto della linea di

adduzione del monomero da SA ai reattori ed un flussaggio/lavaggio con acqua dal serbatoio SA e delle linee escludendo il reattore R afferente la linea della valvola 1. In tale fase all'apertura della valvola manuale della rastrelliera a monte, si accertava la presenza di circa un paio di litri di acqua a valle della valvola 1 e prima della "blind valve" chiusa durante la prova. Non sono presenti strumenti atti a rilevare la presenza di pressione o sostanze nella linea dalla valvola 1 alla blind valve, né il livello di monomero in SA.

La programmazione della produzione prevedeva la ripartenza di almeno tre reattori su sette il **mercoledì**, la Commissione rilevava dai fogli di lavoro invece che la produzione era iniziata il **tardo pomeriggio del martedì** dopo la prova di flussaggio. Da interviste si appurava che il personale di stabilimento ha ritenuto che la quantità di acqua rilevata durante la prova di lavaggio fosse dovuta ad un trafilamento della valvola 1, pertanto procedeva a deviare la manichetta MAN verso la vasca di emergenza. Il personale non ha provveduto ad effettuare ulteriori indagini mirate a determinare le cause della perdita ed i quantitativi effettivi di acqua, il che avrebbe consentito sicuramente di accertare la reale causa imputabile ad erroneo montaggio (inversione del senso) del corpo valvola, che di fatto era completamente aperta all'azionamento del comando di chiusura.

La suddetta operazione di modifica impiantistica non era contemplata nel manuale operativo del reparto A, mentre era citata nel registro di consegna turno alle 22:00 del martedì, senza specificarne le cause. Sarebbe stato possibile disconnettere l'ingresso della valvola 1, ma tale operazione avrebbe comportato la chiusura della valvola manuale a monte rastrelliera, che di fatto avrebbe privato di monomero tutti i reattori non consentendo la produzione all'interno del reparto; invece la scelta di non chiudere la "blind valve" a valle della valvola 1, senza deviare il processo alla vasca di emergenza, era stata dettata dalla necessità di evitare solidificazioni di prodotto con rischi di polimerizzazioni (assenza di linee tracciate o riscaldate).

L'operatore del **turno di notte tra il martedì e mercoledì** aveva registrato durante la produzione valori anormali (in diminuzione) delle temperature di reazione, segno di una cattiva conduzione della stessa, senza esserne in grado nell'immediato di valutarne le cause ed inoltre nella compilazione del registro di consegna del turno successivo non si aveva più evidenza dello stato della manichetta a monte del reattore R (con perdita certa di informazioni per gli operatori montanti nel nuovo turno).

Si poteva ritenere che la diminuzione di temperatura durante la reazione fosse riconducibile o ad una errata/mancata termostatazione (inverosimile), oppure ad una mancanza di reagente rispetto a quello stabilito nella "ricetta" (reazione non autosostenuta).

Un esame più accurato di tutti i dati disponibili effettuato dagli operatori il **mercoledì mattina** conduceva a rilevare e stimare la presenza di 2/3 tonnellate di monomero all'interno della vasca di emergenza; nella vasca erano già presenti acqua e soda oltre ad un quantitativo precisato di sostanza inibitrice e schiuma. La vasca non era

dotata di misuratori di livello e di temperatura (presenza del solo passo d'uomo ed attacco per l'immissione di schiuma e pompe di estrazione), per cui non era possibile una misura esatta ed immediata del monomero in essa presente e dello stato evolutivo di potenziali reazioni spontanee. Inoltre, la vasca non era dotata di mescolatore meccanico.

Sono state quindi dettate agli operatori del reparto A istruzioni verbali (non erano reperibili atti scritti) da rispettare ad ogni cambio turno mirate a:

- ispezionare il contenuto della vasca mediante l'apertura del passo d'uomo;
- esaminare visivamente, valutare la quantità di monomero presente all'interno della vasca e rilevare eventuali odori (il monomero in questione ha una soglia olfattiva molto bassa);
- aggiungere (qualora necessario) ulteriore inibitore;
- analizzare la reattività del monomero.

Alle **ore 24:00 del venerdì** è avvenuto il passaggio di consegne dal responsabile del reparto A al responsabile del reparto B, in quanto nel reparto A nel fine settimana non è prevista la produzione, pur garantendo la presenza di un operatore reperibile. Tale passaggio viene riportato su un apposito registro, che non faceva menzione della presenza di monomero all'interno della vasca d'emergenza e delle procedure di monitoraggio in atto.

La sala controllo del reparto A è distante da quella del reparto B, generalmente il personale di tale reparto effettua semplici ispezioni delle aree del reparto A (ronde) durante il fine settimana.

Nella **tarda serata della domenica** il responsabile del reparto B percepiva dalla sala controllo dello stesso reparto un odore anomalo; non riscontrando anomalie nella zona del suo reparto, si recava nella zona del piazzale esterno e notava del fumo che usciva dal camino dell'abbattitore collegato alla vasca del reparto A, per cui provvedeva ad attivare le procedure di emergenza e a contattare il reperibile del reparto A. La procedura ha previsto l'attivazione immediata di un sistema di soppressione (lavaggio in controflusso) a camino, con eliminazione dell'emissione, inoltre successive fasi di gestione in sicurezza della vasca fino allo smaltimento del suo contenuto.

3.4 Approfondimento delle evidenze documentali

Al fine di effettuare una ricognizione di tutte le cause sono stati analizzati approfonditamente i contenuti dei documenti acquisiti con le seguenti ulteriori deduzioni:

- dalla scheda di sicurezza della sostanza si rileva la necessità del controllo della temperatura del monomero e dei tempi in tutte le condizioni di stoccaggio, oltre al controllo di limpidezza. La scheda fornisce indicazioni sui quantitativi e sul livello di inibitore per unità di sostanza in eventuale vasca di ritenzione, fornendo oltremodo indicazioni sulle condizioni di miscelazione tra inibitore e sostanza (la vasca di emergenza era priva di mescolatore in continuo). Il Gestore si è basato sulla quantità di inibitore iniziale necessaria nella vasca di emergenza in base al

- quantitativo di sostanza di un reattore, senza prevedere che lo scarico dai reattori generalmente avviene per sostanza già parzialmente reagita e non pura, non ha valutato le condizioni di miscelazione e di controllo livelli e temperatura;
- il manuale operativo del reparto A elenca tra le anomalie la possibilità di scarico dei dischi di rottura verso la vasca di emergenza, in tal caso il monomero passa attraverso la colonna di abbattimento C (la rilevazione di sovrappressione del reattore interessato attiva automaticamente tale sistema). In caso di mancato intervento automatico del sistema di abbattimento esiste una idonea procedura di gestione manuale per abbattimento e lavaggio camino, nella quale è previsto anche il monitoraggio della vasca e la visione del livello di prodotto in essa contenuto attraverso l'oblò. Per tale anomalia è prevista l'informazione ai capi area dei reparti A e B;
 - il manuale operativo del reparto A ammette lo scarico volontario di prodotto dal fondo del reattore, al verificarsi di quest'evento il personale di reparto deve informare il Servizio Antincendio dello stabilimento che vigila sulla effettiva erogazione di schiuma, effettua altresì il flussaggio di lavaggio colonna C e camino per evitare la fuoriuscita di eventuali vapori di polimerizzazione. Le azioni di monitoraggio "ripetuto" e quelle di immissione schiuma e lavaggio colonna/camino sono espressamente indicate;
 - il manuale operativo del reparto A è privo di indicazioni, in caso di guasto, dell'esclusione delle valvole tipo 1 e del conseguente utilizzo di manichette flessibili per invio diretto del prodotto intercettato a monte dei reattori nella vasca di emergenza, nonché delle conseguenti azioni di monitoraggio;
 - la procedura di informazione prevede riunioni giornaliere, ispezioni in campo pianificate, comunicazioni e segnalazioni da parte del personale, giri del management, compilazione di check list su eventi. Una corretta applicazione dello schema di flusso contenuto nella procedura avrebbe certamente consentito di pianificare in maniera adeguata le azioni ed il monitoraggio del monomero presente all'interno della vasca, anche se la procedura è priva di strumenti di informazione efficaci nell'immediato (carenti o assenti gli strumenti di comunicazione degli eventi e delle azioni correttive da garantire continuamente e nell'immediato);
 - una delle istruzioni di comunicazione prevede l'impiego di registri delle consegne e dei fatti salienti al cambio turno, in ottemperanza ad essi risultano gli episodi salienti rilevati nel corso del turno e le anomalie di marcia riscontrate; non risultano evidenze delle disposizioni relative alle modalità di conduzione dell'impianto con deviazioni in atto, né indicazioni sulle situazioni anomale riguardanti la sicurezza e l'ambiente e le relative comunicazioni di carattere gestionale e organizzativo;
 - nel verbale di meeting del mercoledì risultano due near miss (non identificati per oggetto) e si fa menzione delle due reazioni fuori specifica, non risulta altra informazione ad esempio riguardo alla gestione del monomero all'interno della vasca di emergenza; nel verbale di meeting del giovedì si confermano i due near miss senza indicazioni sulla gestione, risulta la convocazione di un meeting della

- domenica a seguito dell'accadimento dell'evento incidentale ma non si ha riscontro di verbali, né è seguita una comunicazione;
- gli elementi critici individuati con apposita procedura non contemplano le valvole tipo 1 oggetto di frequenti malfunzionamenti; la procedura annovera tra gli elementi critici anche apparecchiature, macchinari, strumentazioni e attrezzature assimilabili ad elementi critici che non generano Top Event ma che, sulla base dell'esperienza operativa, hanno comportato (con il loro guasto oppure con il loro mancato intervento) anomalie, near-miss, quasi incidenti, incidenti, infortuni, quasi infortuni, in cui sono state coinvolte una o più sostanze pericolose ai sensi del CLP, tali da farli ritenere elementi critici. Non sono previste manutenzioni predittive sulle valvole di tipo 1;
 - poiché il manuale operativo del reparto A non contempla quale operazione ordinaria la deviazione di una o più linee a monte dei reattori verso la vasca di blow-down, tale eventualità doveva essere gestita quale modifica temporanea mediante la specifica procedura, ciò avrebbe consentito di effettuare una corretta analisi dei rischi e di approntare misure di sicurezza idonee, da consolidare in una modifica definitiva;
 - i responsabili dello stabilimento industriale hanno ritenuto di non applicare la procedura di gestione di eventi non pianificati (ad esempio per sversamenti o rilasci che generano la perdita di un agente chimico in qualsiasi stato fisico anche se intercettato da un sistema di contenimento e che riguardi rilasci in un contenimento) ritenendo che l'evento occorso rientrava tra quelli pianificati; tale valutazione risulta erranea in quanto la deviazione delle manichette non è presente nei manuali operativi e quindi non è un'azione per anomalie previste e valutate;
 - non è stata applicata la procedura di gestione delle non conformità; quindi, non è presente un'informazione documentata dell'azione correttiva e dei piani di monitoraggio in atto nella gestione della vasca di emergenza tra il lunedì e la domenica.

4. L'analisi delle cause

4.1 Elenco delle cause

La Commissione ha stilato l'elenco delle cause comuni che hanno condotto all'evento incidentale e che si possono così riassumere secondo un ordine cronologico con riferimento alla timeline:

1. inosservanza di indicazioni contenute nella scheda di sicurezza (controllo temperatura e miscelazione)
2. mancanza di uno studio specifico dei quantitativi di inibitore e della sua efficacia in relazione agli eventi di Stabilimento;
3. assenza di apposita analisi di rischio per l'invio di grossi quantitativi di reagenti alla vasca di emergenza (ad esempio per bypass di un reattore a monte), valida anche per l'invio di reagenti e prodotti classificati in allegato 1 al D.Lgs 105/15;
4. erranea applicazione della procedura di identificazione delle apparecchiature critiche, con riferimento alle valvole tipo 1;

5. assenza di manutenzioni predittive sulle valvole tipo 1
6. assenza di test delle valvole tipo 1 basati su valutazione delle frequenze di guasto delle valvole di tipo 1;
7. erronee o inefficaci procedure di manutenzione e di prova delle valvole tipo 1;
8. mancata formazione operatori di ditte esterne su attività specifiche (montaggio e prova valvole tipo 1);
9. carenze di progettazione di sistemi di controllo nella sezione di caricamento reattori (pressioni, livelli, etc.) e di provvedimenti per evitare la solidificazione dei reagenti nelle linee;
10. assenza nel manuale operativo del reparto A di indicazioni relative al comportamento dell'impianto e degli operatori in caso di anomalie delle valvole tipo 1;
11. assenza del manuale operativo del reparto A dell'uso delle manichette e dei relativi comportamenti per invio reagenti alla vasca di emergenza;
12. disapplicazione procedura modifica temporanea (bypass di un reattore) che avrebbe previsto l'esecuzione di un'analisi di rischio preliminare ed una eventuale progettazione specifica dei sistemi di monitoraggio e sicurezza;
13. assenza di approfondimento delle cause della perdita e delle quantità rilasciate nella vasca di emergenza;
14. assenza di una procedura specifica per invio di monomeri dal miscelatore SA alla vasca di emergenza;
15. mancata informazione documentata sull'evento (check list e verbali di meeting) a tutti gli interessati e sulle azioni conseguenti;
16. mancata applicazione della procedura su eventi non pianificati;
17. mancata applicazione della procedura non conformità;
18. errata applicazione procedura "fatti salienti" per mancate indicazioni di anomalie;
19. mancata applicazione della procedura di emergenza prevista in caso di scarico di fondo dei reattori;
20. procedura di informazione carente nella parte relativa alla comunicazione ed ai relativi strumenti, in caso di eventi ed azioni immediate;
21. mancata informazione documentata sulle procedure di inibizione e controllo del monomero disapplicando procedure presenti in stabilimento per eventi analoghi;
22. mancata informazione e comunicazione dell'anomalia fino alla sua soluzione definitiva (perdita di informazioni nei cambi turno);
23. mancanza informazione documentata sull'efficacia dell'azione correttiva di gestione della vasca di emergenza;
24. carente azione di inibizione in continuo
25. mancanza di indicazioni del comportamento in caso di anomalie nella procedura specifica per il passaggio di consegne tra i reparti A e B;
26. carenza di dotazioni impiantistiche idonee per la vasca di emergenza (mescolatore ed indicazione livello), per la colonna e l'abbattitore (automatismo in caso di rilevazione di pressione o temperatura inadeguate in caso di scarico non voluto di monomero), assenza allarmi sulla sezione di trattamento reflui.

4.2 Root cause analysis RCA, Diagramma di Ishikawa e cause di radice ^[2]

La root cause analysis (RCA) è una tecnica di indagine che viene applicata ad eventi significativi, in particolare incidenti e quasi incidenti, ed è finalizzata ad esaminare quanto accaduto con la finalità di individuare le cause e non i colpevoli. La RCA è basata su un approccio metodologico che presenta l'evento finale come un accadimento non voluto, il percorso dell'analisi tende a individuare le cosiddette latent condition (condizioni organizzative e di contesto di lavoro con lacune, inefficienze ed errori di tipo progettuale) e latent failure (condizioni concrete in cui gli individui si trovano ad operare). L'analisi si conclude con l'esame delle active failure, cioè le azioni non sicure, gli errori umani e le violazioni, che portano all'insorgere dell'incidente. L'impiego delle varie tecniche della RCA prevede di definire il problema, comprendere il processo, identificare le possibili cause, raccogliere ed analizzare i dati. La RCA si completa con le fasi (non analizzate nella presente memoria) riguardo l'individuazione di possibili soluzioni, la loro selezione ed implementazione, la valutazione degli effetti ed il consolidamento del cambiamento. Il diagramma di Ishikawa (detto anche diagramma causa effetto) è uno dei metodi utilizzati per la RCA ed è stato concepito per aiutare le aziende a cercare in maniera strutturata i problemi e le relative cause. Con esso si rappresenta graficamente ogni problema per il quale si intende trovare una soluzione duratura con le relative cause. Sul lato destro del grafico si inserisce il problema, nel nostro caso l'evento, sulla linea che si indirizza al problema si dipartono altre linee secondarie sulle quali sono raggruppate le possibili cause del problema. Il raggruppamento viene effettuato secondo le macroaree (variabili principali) sottoindicate:

- ✓ Materiali
- ✓ Macchine
- ✓ Metodi
- ✓ Manodopera
- ✓ Milieu (ambiente)
- ✓ Management
- ✓ Misurazioni
- ✓ Money (denaro).

Vi sono diversi metodi di costruzione del diagramma a seconda del grado di approfondimento e del numero di macroaree da indagare e dei raggruppamenti (metodo da 4M ad 8M).

Per trovare la causa effettiva di un problema, si ricorre al cosiddetto metodo delle 5 W, secondo questo metodo ci si domanda per cinque volte "perché" su ogni singola causa (in tal modo si riescono anche a raggruppare meglio le concause) e si sceglie la causa principale (brainstorming del gruppo di lavoro che individua le priorità). Non bisogna tuttavia dimenticare che la finalità principale del diagramma di Ishikawa è di portare ordine nel processo di risoluzione dei problemi, rappresenta quindi una notevole semplificazione e non si entra nella complessità dei processi industriali, delle causalità temporali così come delle interazioni reciproche che non sono rappresentabili. Durante l'analisi e l'approfondimento del problema

occorrerebbe suddividere ulteriormente questi sottopunti. Per motivi di brevità di trattazione e rappresentazione, in figura 2, sono state adottate solo 6M ed è stato effettuato un raggruppamento fino alla prima linea.

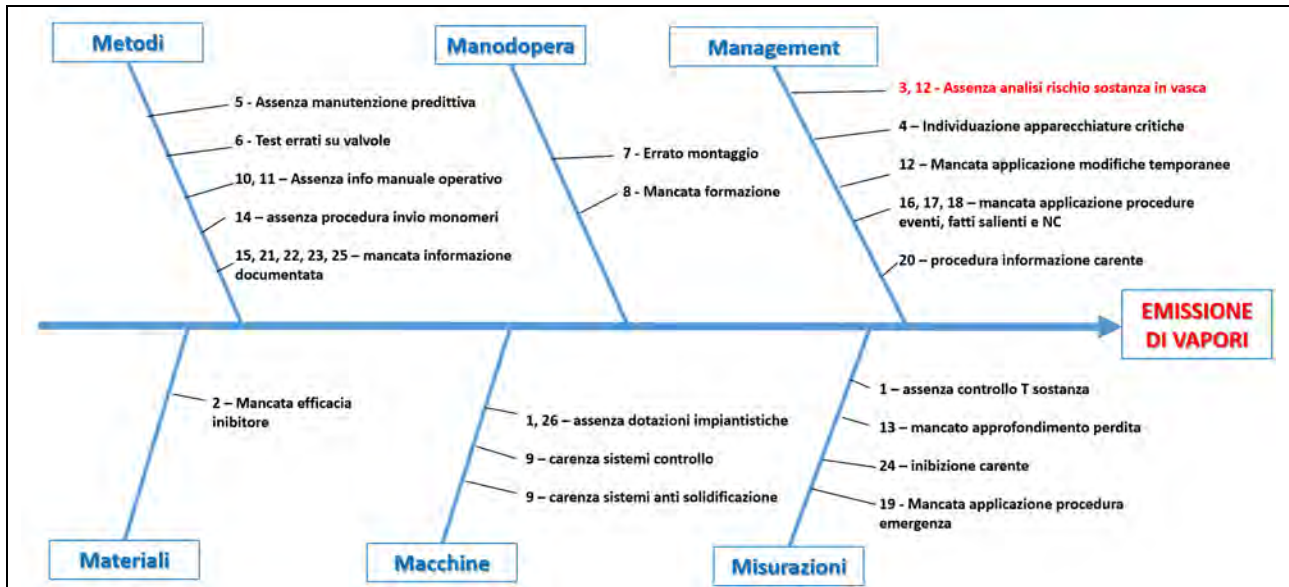


Figura 2. Diagramma di Hishikawa dell'evento incidentale

La causa di radice va individuata nella mancanza di un'analisi di rischio preliminare o quantomeno della modifica temporanea, condotta secondo i criteri del D.Lgs 105/15. Quest'analisi era necessaria, in quanto, seppur in atto nello stabilimento procedure di invio di prodotti alla vasca di emergenza e di gestione in emergenza di tali accadimenti (scarico reattori e dischi di rottura), l'invio di un monomero non reagito volontario o occasionale (deviazione delle manichette) in quantità elevate avrebbe avuto come conseguenza (come si è poi manifestato) un differente comportamento della sostanza con riferimento al tempo. Si è dimostrato che gli impianti, le azioni di mitigazione e quelle di emergenza hanno fallito a causa del mancato studio, l'assenza o carenza di comunicazioni (possibile errore umano) ha solo reso inefficaci azioni estemporanee e non programmate secondo criteri di analisi e tecnici verificati. Una corretta analisi del rischio avrebbe comportato la necessità di valutare, tra l'altro, tutte le sostanze pericolose che potevano essere immesse nella vasca, le loro caratteristiche e quantità, effettuare una analisi quantitativa del rischio (event e fault tree analysis ETA, FTA), con ovvia verifica dei ratei di guasto, dell'incidenza del fattore umano, dell'idoneità degli impianti adottati, tutte misure atte a ridurre al minimo la frequenza di accadimento dell'evento (rilasci in vasca di emergenza) e dello scenario (emissione di vapori).

5. Conclusioni

Il supplemento di ispezione messo in atto in occasione dell'evento ha generato 10 raccomandazioni e 14 proposte di prescrizione; eccetto una raccomandazione già

prevista in generale nell'ispezione ordinaria (adeguamento di alcuni P&I), per le altre non era stato formulato analogo riscontro gestionale.

Le attività di ispezione ordinaria sono generalmente orientate in forma di "audit" ed atte a verificare, mediante la lista di riscontro (Appendice 3 del D.Lgs 105/15), l'assolvimento degli obblighi giuridici e normativi. I tempi limitati di ispezione obbligano spesso a non approfondire temi specifici, quali ad esempio l'analisi del Gestore degli eventi incidentali (analisi esperienza operativa (Appendice 2 sezione 2 del D.Lgs 105/15).

Anche l'approccio utilizzato da molti Gestori è orientato evidentemente all'assolvimento degli obblighi mediante procedure e moduli di registrazione complessi rispetto anche alle risorse disponibili ed ai tempi di gestione complessivi dei processi aziendali.

In questo contesto è di fondamentale importanza migliorare le capacità di analisi del rischio, anche al fine di non sottostimare alcuni eventi, la partecipazione a tale analisi da parte di tutti gli operatori coinvolti nei processi, l'analisi delle cause in occasione di accadimenti di eventi iniziatori e finali più o meno significativi.

L'adozione di misure organizzative, gestionali e tecniche nell'ottica del miglioramento continuo risultano tanto più efficaci quanto più sarà evoluto il processo di comunicazione, coinvolgimento, maturazione delle conoscenze in tutto il contesto aziendale.

Bibliografia

- [1] Decreto Legislativo 26 giugno 2015, n. 105. Attuazione della direttiva 2012/18/UE relativa al controllo del pericolo di incidenti rilevanti connessi con sostanze pericolose.
- [2] [Diagramma di Ishikawa | Come funziona il diagramma causa effetto - IONOS](#)

Interferenza fra attrezzature per lavori in quota e impianti di processo negli stabilimenti con pericolo di incidente rilevante

F.M. Fabiani, S.M. Ansaldo

Inail – Dit

Abstract

Nell'esperienza operativa degli stabilimenti con pericolo di incidente rilevante (PIR), si riscontrano alcuni eventi accaduti durante attività lavorative con l'impiego di attrezzature per lavori in quota, soprattutto ponteggi, utilizzate per lavori di manutenzione e riparazione di varia natura.

Tali eventi sono da ricondurre all'interferenza fra tali attrezzature provvisorie e parti di impianto, in particolare per quel che riguarda il loro utilizzo in base allo specifico contesto.

L'obiettivo del presente lavoro è portare l'attenzione su questa problematica e fornire indicazioni utili ai gestori degli stabilimenti, alle ditte appaltatrici e agli ispettori Seveso per coniugare gli aspetti legati all'utilizzo in sicurezza dei ponteggi e la prevenzione degli incidenti rilevanti.

L'attività è partita dall'analisi delle schede di esperienze operative, raccolte dagli ispettori Seveso in Italia durante le ispezioni di cui all'art. 27 del d.lgs. 105/2015.

Tali schede sono state raccolte e indicizzate in un archivio, gestito da EsOpIA (Esperienze Operative e Intelligenza Artificiale), un motore di ricerca dell'Inail basato su tecniche di machine learning e intelligenza artificiale.

In questo modo è stato possibile selezionare con modalità automatiche le schede relative alla tematica in oggetto ed analizzare gli eventi specifici.

Analoga ricerca è stata effettuata consultando banche dati internazionali, quali ARIA-BARPI e e-Mars.

Lo studio dimostra che l'interferenza delle attrezzature per lavori in quota con parti di impianto può essere causa di quasi incidenti oppure concausa di incidenti rilevanti negli stabilimenti PIR.

Dall'analisi dei documenti, sono stati evidenziati gli eventi più significativi e indicate misure di prevenzione in forma di lezioni apprese.

Keywords: Esperienze operative, cantieri, ponteggi.

1. Introduzione

Il lavoro ha preso spunto dalla segnalazione di un ispettore Seveso che aveva riscontrato, durante un'ispezione, un caso di interferenza tra un ponteggio e l'impianto. Lo studio si è avviato per capire quando i ponteggi siano utilizzati

all'interno degli stabilimenti Seveso e se, durante il loro utilizzo, si siano verificati eventi, con o senza conseguenze.

Nelle industrie chimiche e petrolchimiche, soggette alla Direttiva Seveso (d.lgs. 105/15) [1] le "esperienze operative" sono la raccolta storica di schede di incidenti, quasi incidenti e anomalie accaduti in uno stabilimento; esse fanno parte integrante del Sistema di Gestione della Sicurezza (SGS) in materia di prevenzione degli incidenti rilevanti. Ogni scheda, come richiesto nel d.lgs. 105/15 (Allegato H, sezione 2), riporta sia la descrizione di quanto accaduto e delle azioni intraprese, sia i risultati dell'analisi, effettuata dal Gestore dello stabilimento, per fornire indicazioni sugli elementi del sistema di gestione della sicurezza coinvolti.

L'analisi delle esperienze operative permette di evidenziare gli elementi, tecnici ed organizzativi, di debolezza del SGS; ma allo stesso tempo rappresenta una "opportunità" di miglioramento della sicurezza.

Lo studio degli eventi incidentali minori e di quelli che non hanno avuto conseguenze (quasi-incidenti, anomalie) nasce e si sviluppa storicamente in quei settori (ad esempio aeronautico, nucleare, chimico) nei quali gli eventi incidentali accadono di rado, ma quando avvengono hanno conseguenze disastrose.

Registrare, monitorare, analizzare gli eventi "minori" e i quasi-incidenti significa capire che cosa ha "fallito" (ciò che li ha provocati) e che cosa ha "funzionato" (ciò che ha ostacolato il verificarsi dell'evento maggiore, "disastroso"), come illustrato in [2, 3].

Così, da un lato, si possono ricavare degli indicatori significativi di criticità del SGS, dall'altro si aumenta la consapevolezza dell'utilità dei sistemi tecnici e degli aspetti organizzativi.

Negli stabilimenti PIR Il Sistema di Gestione della Sicurezza struttura e organizza in modo razionale tutte le attività relative alla sicurezza dell'impianto. Ciò si realizza anche attraverso l'implementazione di procedure e istruzioni operative che regolano il funzionamento (l'esercizio) in condizioni di sicurezza, inclusa la manutenzione dell'impianto, la gestione dei processi e delle attrezzature.

I Permessi di Lavoro (PdL) sono documenti per autorizzare, gestire e fornire indicazioni sull'esecuzione di lavori all'interno di uno stabilimento, destinati ai lavoratori (interni e di ditte esterne) dei rischi specifici inerenti l'area di lavoro e le attività da svolgere [4].

Quando si ha la necessità di eseguire lavori di costruzione o di manutenzione in quota, cioè ad una altezza pari o superiore a 2 m rispetto ad un piano stabile (d.lgs. 81/08), devono essere impiegate idonee attrezzature, in relazione alle lavorazioni da svolgere, alle caratteristiche del sito di lavorazione.

Negli stabilimenti PIR, il ponteggio è un'attrezzatura molto utilizzata a tale scopo.

Da un lato, la costruzione e l'utilizzo di un ponteggio sono normati a livello legislativo [d.lgs. 81/08], dall'altro le attività lavorative di manutenzione all'interno dei siti PIR sono regolate e gestite attraverso apposite procedure e PdL. L'analisi delle esperienze operative hanno evidenziato che la gestione della sicurezza dei singoli

ambiti, cioè l'utilizzo del ponteggio e l'esecuzione delle lavorazioni nel sito PIR, separatamente, non è sufficiente a garantire la sicurezza dell'intero sistema (utilizzo del ponteggio nell'impianto).

2. Obiettivi

Questo lavoro, partendo dall'analisi di casi reali, intende evidenziare gli aspetti più critici derivanti dall'interferenza fra l'utilizzo di ponteggi e parti di impianto, in particolare per quel che riguarda lo specifico contesto degli stabilimenti PIR.

L'obiettivo è portare l'attenzione su questa problematica e fornire indicazioni utili ai gestori degli stabilimenti, alle ditte appaltatrici e agli ispettori Seveso per coniugare gli aspetti legati all'utilizzo in sicurezza dei ponteggi e la prevenzione degli incidenti rilevanti.

Nella sezione 3 si illustrano brevemente le banche dati consultate e le modalità di ricerca per estrarre i casi studio descritti nella sezione 4. Nella sezione 5 si riportano i risultati dell'analisi dei casi studio, anche riassunti in forma di lezioni apprese; alcune considerazioni conclusive sono contenute nella sezione 6.

3. Materiali e metodi

Lo studio si basa sull'analisi di documenti contenuti in tre differenti archivi di eventi incidentali in ambito industriale.

Di seguito ne viene fornita una breve descrizione, oltre alla descrizione dei metodi di ricerca utilizzati per estrarre i documenti di interesse.

3.1 EsOplA

L'archivio documentale delle esperienze operative raccolte dagli ispettori Seveso durante le ispezioni di cui all'art. 27 del d.lgs. 105/2015, è gestito da EsOplA (Esperienze Operative e Intelligenza Artificiale), un motore di ricerca di Inail basato su tecniche di Machine Learning (ML) e Intelligenza Artificiale (IA) [5].

Il modello (ontologia) definito in EsOplA, è stato progettato per rappresentare il testo contenuto nei documenti attraverso i concetti che lo caratterizzano e le relazioni che intercorrono tra essi. I concetti (o entità) individuati sono quelli generalmente presenti nei documenti delle esperienze operative, quali: attrezzatura (*apparatus*), evento (*event*), sostanza (*substance*), barriera (*barrier*), attività (*activity*), persona (*people*). Alcuni di questi concetti sono stati suddivisi in sotto-classi (o sotto-entità) per fornire dettagli più specifici. L'entità evento, ad esempio, è stata dettagliata per descrivere l'evento incidentale (*major*), la perdita di contenimento (*loss*), il guasto o fallimento generale (*failure*), il meccanismo di deterioramento (*deterioration*), oppure l'evento positivo (*success*). L'entità barriera (*barrier*) fa riferimento alle misure (barriere) di prevenzione e di mitigazione, sia tecniche (*technological*) che organizzative (*organizational*), menzionate in ciascun documento. Per entità *people* si intende il tipo di ruolo del personale coinvolto. Le relazioni permettono di definire un "legame" logico tra singole parole (o sequenze di parole)

contenute nel documento; in particolare la relazione di *causa* evidenzia la sequenza di eventi.

Il sistema utilizza tecniche di ML per estrarre in modo automatico le informazioni contenute in ogni documento, classificando i termini trovati nel testo e mettendoli in relazione fra di loro sulla base del modello concettuale definito [6].

Il sistema attualmente contiene circa 4000 esperienze operative provenienti da vari settori, tra i quali quello chimico, petrolchimico, depositi di gas, esplosivi.

Il metodo adottato per la ricerca dei documenti è quello di interrogare l'archivio utilizzando sia il linguaggio naturale sia la selezione degli elementi del modello estratti, classificati e automaticamente aggiornati dal sistema.

3.2 Aria del BARPI

Il sistema Aria (Analysis, Research and Information on Accidents), realizzato dal BARPI (*Bureau d'Analyse des Risques et Pollutions Industriels*) in Francia [7] è l'archivio multimediale degli incidenti relativi a tutti i siti produttivi, inclusi gli stabilimenti Seveso e sono classificati in base alla severità e al tipo di conseguenze.

Il sistema dispone di circa 50000 relazioni di incidenti, occorsi prevalentemente in Francia.

Le relazioni dei singoli eventi sono testi non strutturati che descrivono l'incidente e le azioni intraprese; le pubblicazioni sono invece documenti organizzati secondo diversi tipi di formati, da bollettini sintetici a documenti tematici estesi.

La ricerca si effettua indicando i termini che si vogliono trovare nei documenti (in inglese o francese) e si può perfezionare selezionando parole chiave fornite automaticamente dal sistema. I filtri che si possono applicare nella ricerca sono di tipo generale, quali, ad esempio, l'area tematica, il tipo di pubblicazione o l'anno di accadimento; oppure sono criteri specifici dell'incidente: la localizzazione (es.: stato, regione, città), le sue caratteristiche (es.: evento, attrezzature, sostanze), le tipologie di cause e conseguenze.

3.3 eMars

La banca dati eMARS [8] è l'archivio delle segnalazioni degli incidenti rilevanti e dei quasi incidenti avvenuti negli Stati Membri della Comunità Europea, istituito dalla direttiva Seveso 82/501/CEE dell'UE nel 1982, ed ancora in vigore. Lo scopo di eMARS è quello di "*facilitare lo scambio di lezioni apprese al fine di migliorare la prevenzione degli incidenti chimici e la mitigazione delle potenziali conseguenze*" [8].

L'archivio dispone di 1188 documenti; i report sono organizzati secondo un formato standard, suddiviso in sezioni: informazioni generali, descrizione dell'incidente, descrizione del sito, sostanze coinvolte, cause, conseguenze, risposte all'emergenza, lezioni apprese. Ogni sezione si compone di una parte descrittiva a testo libero e di una parte a selezione multipla di parole chiave predefinite.

La ricerca si svolge indicando parole (in inglese) che sono contenute all'interno dei documenti, con la possibilità di poter selezionare alcuni parametri generici assegnati

a ciascun documento, quali ad esempio l'anno di accadimento, il tipo e la gravità dell'evento.

4. Casi studio

In questa sezione si illustrano le schede estratte in ciascun archivio, utilizzando il termine *ponteggio* e i corrispondenti *scaffold*, in inglese, ed *échafaudage*, in francese. Il numero dei documenti contenenti tale termine è in generale basso in tutti e tre gli archivi.

Le tabelle illustrate in questa sezione riportano l'identificativo del documento estratto, relativo all'archivio di provenienza, ed una breve descrizione.

Per ogni archivio i documenti sono stati raggruppati in base ai seguenti tre criteri:

- eventi dovuti all'interferenza tra componenti di ponteggio e dispositivi di controllo/regolazione dell'impianto durante il montaggio e lo smontaggio di ponteggi
- eventi dovuti all'interferenza tra ponteggio e parti di impianto per errato posizionamento del ponteggio
- eventi dovuti a scarsa pulizia e scarso ordine del posto di lavoro.

4.1 Analisi schede EsOPIA

Le schede estratte utilizzando il termine "ponteggio" sono risultate sedici. Di queste solo sette sono pertinenti con gli obiettivi dello studio, cioè riportano eventi in cui il ponteggio è stato direttamente coinvolto [10].

Dall'analisi dei modelli estratti automaticamente dal sistema da ciascuna di queste schede, emerge che le attività, messe in relazione al ponteggio, sono quelle di *costruzione, installazione, montaggio, smontaggio, movimentazione*. Emerge inoltre che l'elemento *ponteggio* è in relazione diretta con gli eventi *danneggiamento* e *urto*.

La Tabella 1 riporta la descrizione di eventi dovuti all'interferenza tra componenti del ponteggio e dispositivi di controllo/regolazione dell'impianto.

| ID | Descrizione |
|------|---|
| 684 | <i>Rilascio sostanza pericolosa. Fuoriuscita di [sostanza facilmente infiammabile] da uno spurgo sulla linea che collega il reattore di produzione al ribollitore. Durante la costruzione del ponteggio gli operatori hanno presumibilmente urtato contro il sensore di fine corsa della valvola, l'operatore al quadro allertato da DCS movimentava causando la fuoriuscita di della sostanza da uno spurgo. La nube investiva i 4 operatori addetti alla costruzione del ponteggio.</i> |
| 351 | <i>Apertura accidentale della valvola della presa campione. Durante la costruzione del ponteggio, l'operatore, con un tubo innocenti, urtava e apriva inavvertitamente la valvola della presa campione H2O2 di produzione. L'H2O2 dalla presa campione defluiva verso l'imbutto di raccolta che non riuscendo a smaltirla completamente si riempiva facendo stramazzare il liquido sulla platea.</i> |
| 2861 | <i>Rilascio di Acido Cloridrico. Rilascio da un raccordo flessibile in PVC durante l'installazione di un ponteggio di protezione delle macerie da parte di un'impresa esterna. Urto per movimentazione componenti ponteggio.</i> |

| | |
|------|--|
| 2028 | <i>Blocco del forno per disservizio. Durante le attività di smontaggio ponteggio fronte forno presso la valvola regolatrice i dipendenti di una ditta esterna hanno incautamente poggiato paline e pianali sul gruppo di regolazione impedendone il corretto funzionamento e quindi il controllo remoto da DCS; la valvola in oggetto è la valvola regolatrice di pressione del fuel gas al forno. Gli ingombri impedivano la chiusura della valvola, richiesta dal loop di controllo della pressione. Da sala controllo il quadrista rilevava (tramite allarme) un eccessivo offset tra valore di set point e valore misurato della pressione, pertanto richiedeva una verifica in campo sul gruppo di regolazione da parte dell'operatore esterno. Successivamente l'operatore esterno verificava la presenza del materiale poggiato sul gruppo di regolazione dalla ditta esterna e riferiva tramite radio al capoturno; quest'ultimo dava disposizioni alla ditta per la rimozione del materiale malposto seguito della rimozione si verificava la repentina chiusura della valvola con conseguente riduzione della pressione sino ai valori di blocco e conseguente blocco del forno.</i> |
|------|--|

Tabella 1. Schede EsOplA: eventi dovuti all'interferenza tra componenti di ponteggio e dispositivi di controllo/regolazione dell'impianto durante il montaggio e lo smontaggio di ponteggi.

I primi tre documenti riportano i casi in cui, durante il montaggio del ponteggio, la movimentazione di componenti ha provocato urto con alcune parti dell'impianto (sensore fine corsa, valvola presa campione, flessibile) causandone la rottura. In alcuni casi, c'è stata fuoriuscita di sostanze pericolose.

L'ultimo caso della Tabella 1 (ID 2028) riporta che, durante le attività di smontaggio, alcuni componenti del ponteggio sono stati appoggiati, da lavoratori di una ditta terza, su un gruppo di regolazione della pressione del gas dell'impianto. Ciò ha provocato il mancato funzionamento dei sistemi, impedendo il controllo remoto da parte degli operatori del Distributed Control System (DCS). Comunque, l'attivazione dell'allarme in sala controllo ha permesso l'intervento dei responsabili.

La Tabella 2 riporta le schede relative a segnalazioni di interferenza dovute all'errato posizionamento del ponteggio rispetto all'impianto, rilevati quando il ponteggio era già stato installato. In un caso (ID 5223) l'interferenza ha provocato la deformazione di un tubo primario di uno strumento collegato ad un reattore, la situazione è stata scoperta in tempo prima che ci fossero conseguenze.

| ID | Descrizione |
|------|--|
| 5223 | <i>Danneggiamento primario da ponteggio. Durante l'installazione di un ponteggio è stato danneggiato il primario dello strumento (tubing)</i> |
| 3274 | <i>Caduta lampada. Nell'area dell'essiccatore malico durante la fase di riavviamento del trasporto pneumatico, una lampada si staccava dai supporti cadendo a terra. Nella mattinata era stato montato un ponteggio le cui estremità erano in contatto da una parte con l'essiccatore e dall'altra con la lampada stessa. Nel pomeriggio l'essiccatore è stato riavviato e molto probabilmente le vibrazioni prodotte dal suo funzionamento si sono trasmesse alla lampada tramite il ponteggio, causando la rottura dei supporti.</i> |

Tabella 2. Schede EsOplA: eventi dovuti all'interferenza tra ponteggio e parti di impianto per errato posizionamento del ponteggio.

La scheda (ID 3274) descrive la caduta di una lampada per effetto della trasmissione delle vibrazioni del macchinario attraverso il ponteggio, costruito a contatto con un macchinario in funzione. Questo evento potrebbe sembrare di scarso interesse, dal

momento che la conseguenza è stata solo una lampada rotta; ma, l'importanza della segnalazione risiede nell'aver evidenziato un errato posizionamento del ponteggio in relazione ad una parte di impianto in funzione.

Infine, la scheda riportata in Tabella 3 illustra un caso di principio di incendio dovuto al malfunzionamento di una lampada dimenticata al termine del lavoro all'interno di un'attrezzatura. Questo esempio evidenzia quanto sia importante mantenere pulito e in ordine il posto di lavoro.

| ID | Descrizione |
|-----|---|
| 861 | <i>Principio di incendio interno alla sfera, esclusa dal processo, bonificata. Nei giorni precedenti all'evento era in corso lo smontaggio del ponteggio interno. Cause: malfunzionamento lampada per illuminazione temporanea. Sono state informate le imprese terze, precisando che "Prima di lasciare il luogo di lavoro occorre sempre mettere in sicurezza le attrezzature".</i> |

Tabella 3. Scheda EsOplA: eventi dovuti a scarsa pulizia e scarso ordine del posto di lavoro.

4.2 Analisi schede Aria

La ricerca in Aria è stata eseguita utilizzando il termine inglese *scaffold* e quello francese *échafaudage*. I risultati ottenuti sono 60, ma solo 7 sono pertinenti, cioè riportano eventi in cui il ponteggio è stato direttamente coinvolto in impianti industriali.

Due incidenti, illustrati in Tabella 4, sono stati causati da rotture di elementi dell'impianto in seguito alla collisione con componenti di ponteggio durante la loro movimentazione; in entrambi i casi c'è stata fuoriuscita di sostanze pericolose.

In particolare, il caso ID 57383 riporta la perdita derivata dalla rottura di un rubinetto utilizzato per iniettare vapore in una tubazione destinata ai ribollitori. La rottura è stata localizzata in corrispondenza della saldatura della valvola, sopra la borchia, su cui non era presente nessun rinforzo. La possibile causa individuata e descritta nel documento è stata una collisione durante il montaggio di un ponteggio in prossimità di tale diramazione.

In un impianto chimico (ID 35265), l'acido cloridrico (HCl) è stato rilasciato nell'atmosfera in seguito al malfunzionamento di una valvola di regolazione della pressione su una colonna contenente HCl. Questo malfunzionamento si è verificato in seguito allo strappo del tubo di alimentazione della valvola di regolazione della pressione, causato da errata movimentazione da parte di una ditta di ponteggi.

| ID | Descrizione |
|-------|---|
| 57383 | <i>Alle 18:00, la dietanolammina liquida rigenerata (DEA) è fuoriuscita da una delle unità di idrodesolfurazione diesel (HD2) di una raffineria. Si scoprì che la perdita proveniva dallo scarico congiunto delle pompe sotterranee della colonna del rigeneratore. La perdita è stata causata da una rottura di una connessione DN20 utilizzata per iniettare vapore tramite un tubo DN250 nei ribollitori. In prossimità di questo raccordo erano state predisposte delle impalcature per l'esecuzione dei lavori edili. Durante il suo montaggio e poiché la connessione non è stata rinforzata, è possibile che ci sia stata una collisione con la connessione.</i> |
| 35265 | <i>Fuoriuscita di acido cloridrico. In un impianto chimico, l'acido cloridrico (HCl) è stato rilasciato</i> |

| | |
|--|---|
| | <i>nell'atmosfera in seguito al malfunzionamento di una valvola di regolazione della pressione su una colonna contenente HCl. Questa colonna viene leggermente riscaldata quando la pressione aumenta rapidamente fino alla rottura del disco. Il malfunzionamento è derivato dallo strappo del tubo di alimentazione della valvola di regolazione della pressione da parte di una ditta di ponteggi.</i> |
|--|---|

Tabella 4. Schede Aria: eventi dovuti all'interferenza tra componenti di ponteggio e dispositivi di controllo/regolazione dell'impianto durante il montaggio e lo smontaggio di ponteggi.

Negli incidenti estratti da Aria, si ritrovano anche casi dovuti a posizionamenti errati del ponteggio che hanno impedito il funzionamento o l'accesso a parti dell'impianto, come illustrato in Tabella 5.

| ID | Descrizione |
|-------|--|
| 59427 | <i>Alle 5:06, gli operatori di una fabbrica farmaceutica hanno notato un rapido abbassamento del livello del serbatoio del glicole etilenico. Il prodotto confluisce nelle fognature termali che scaricano nel fiume. La causa primaria dell'inquinamento inviato alle fognature termiche è stata la perdita di glicole attraverso una valvola semiaperta sulla doppia camicia di un reattore durante il riempimento di glicole di quest'ultimo. Tra i fattori aggravanti emerge la presenza di impalcature davanti alle valvole manuali.</i> |
| 54319 | <i>Un'interruzione generale e prolungata dell'energia elettrica nell'impianto ha comportato il fermo delle apparecchiature, compresi i dispositivi di trattamento dei fumi. Durante l'evento una valvola di non ritorno è rimasta bloccata in posizione aperta a causa di una sbarra di un ponteggio. L'ingresso di vapore parassita nella turbina ha poi causato un'eccessiva velocità del GTA, che ne ha provocato l'interruzione e l'interruzione dell'alimentazione elettrica del sito.</i> |
| 59172 | <i>Perdita di acido cloridrico da uno stabilimento chimico. Intorno alle 23:05 si è verificata una perdita di acido cloridrico al 33% a livello del passo d'uomo di un serbatoio in un impianto di produzione chimica. L'allarme è dato dall'attivazione di un sensore. La quantità di acido cloridrico fuoriuscito è stimata in 800 kg. Il ponteggio, predisposto per le ispezioni interne, ha danneggiato il rivestimento butilico interno del serbatoio a livello del passo d'uomo, provocandone la corrosione.</i> |
| 52800 | <i>Perdita di gasolio da un impianto petrolchimico. Intorno alle 9:30, in un impianto petrolchimico, si è verificata una perdita non accesa di gasolio aerosol a livello di un prelievo di strumentazione (flussometro) su una tubazione allo scarico di una pompa dell'unità steam cracker. Essendo il flusso elevato, l'operatore ha attivato il PEI e confinato il personale delle unità circostanti e sottovento. La connessione alla strumentazione all'origine della perdita era in acciaio inossidabile. Una delle ipotesi che potrebbe spiegare la rottura è che la bocchetta sia stata sottoposta a vibrazioni o alla sollecitazione di una barra di ponteggio appoggiata su di essa.</i> |

Tabella 5. Schede Aria: eventi dovuti all'interferenza tra ponteggio e parti di impianto per errato posizionamento del ponteggio

L'incidente (ID 59427) ha provocato una perdita di sostanza pericolosa (glicole) nel fiume, con conseguenti problemi di inquinamento. La causa è stata riscontrata in errori di manovra di valvole manuali, ma la presenza di impalcature costruite in modo tale da impedire l'accesso alle valvole è certamente un fattore che ha contribuito ad aggravare la situazione. L'incidente (ID 54319) è stato causato da un'interruzione dell'energia elettrica che ha bloccato i dispositivi per il trattamento dei fumi, la situazione è stata aggravata dal fatto che la valvola di non ritorno fosse

rimasta bloccata in posizione aperta a causa del posizionamento di una "sbarra" del ponteggio.

Nel caso ID 59172, il ponteggio, predisposto per le ispezioni interne ad un'attrezzatura, è stato installato senza tener conto delle precauzioni necessarie ad evitare che si rovinasse il rivestimento di protezione, causando la corrosione a livello di passo d'uomo e la perdita consistente di acido cloridrico.

Il caso ID 52800 descrive un evento simile, per causa di accadimento, a quanto segnalato in EsOpIA (ID3274), cioè dovuto all'installazione di un componente di ponteggio a contatto con apparecchiatura in funzione che trasferiva vibrazioni. Nel caso segnalato in Aria; le vibrazioni, generate da una pompa e trasmesse attraverso il ponteggio hanno causato la rottura di un tubo. L'incidente ha avuto come conseguenza la perdita di gasolio.

Infine, si ritrova un incidente che evidenzia l'importanza di mantenere in ordine e pulita l'area di lavoro, in particolare sugli impalcati dei ponteggi.

| ID | Descrizione |
|-------|---|
| 57829 | <i>È scoppiato un incendio sulla piattaforma di un'impalcatura in un biscottificio. Sull'impalcatura era presente dell'immondizia. La presenza di rifiuti e impalcature è legata ad un'operazione di bonifica. La temperatura esterna era molto alta.</i> |

Tabella 6. Scheda Aria: eventi dovuti a scarsa pulizia e scarso ordine del posto di lavoro.

4.3 Analisi schede eMars

In questo caso si è cercato il termine inglese *scaffold* e sono risultati due documenti. Entrambi sono incidenti rilevanti e sono dovuti ad urto tra elementi del ponteggio e l'impianto. Nel primo caso (ID 1121) durante il montaggio, in particolare durante il posizionamento degli impalcati, è stato colpito e rotto un tubo con conseguente fuoriuscita di etilene.

| ID | Descrizione |
|------|---|
| 1121 | <i>Rotture del tubo di sfiato di piccolo diametro durante la costruzione di un'impalcatura. Era in corso la costruzione di un'impalcatura come preparazione per le successive riparazioni del sistema a diluvio. Durante l'installazione degli elementi del pavimento dell'impalcatura, l'impalcatura ha colpito un tubo di sfiato da 3/4" su una linea di processo isolata dal freddo in servizio con etilene liquido. Il tubo di sfiato si è rotto, provocando un rilascio verticale di etilene. Conseguenze: nube di gas etilene: la quantità totale rilasciata attraverso l'ugello di 22 mm di diametro interno è stata di ca. 6,4 tonnellate. Tra le lezioni apprese: Discussione di questo incidente con gli appaltatori interni per le attività di ponteggio per aumentare la loro consapevolezza del rischio.</i> |
| 272 | <i>In un impianto chimico, elementi di ponteggio trasportati su un carrello elevatore si sono scontrati alle 10:50 con un tubo alto 2,5 m che fungeva da bypass. 29 t di prodotti tossici e infiammabili sono stati rilasciati attraverso un foro di 1 cm². L'autista, illeso, ha spento il motore del camion e ha dato l'allarme in sala comandi. I veicoli devono circolare a più di 1 m dalle strutture. L'autista avrebbe valutato male questa distanza.</i> |

Tabella 7. Schede eMARS: eventi dovuti all'interferenza tra componenti di ponteggio e dispositivi di controllo/regolazione dell'impianto durante il montaggio e lo smontaggio di ponteggi.

Il secondo caso (ID 272) non è direttamente legato al ponteggio, avrebbe potuto verificarsi a seguito di un trasporto di qualunque altro tipo di materiale, ma viene qui riportato perché la movimentazione degli elementi del ponteggio è un'operazione necessaria che deve tener conto del contesto in cui si sta lavorando.

5. Risultati

In questa sezione si discutono i casi studio estratti e riportati nella precedente sezione.

Le Tabelle 8, 9, 10 raggruppano i documenti dei diversi archivi in base ai tre criteri utilizzati nella sezione precedente:

- eventi dovuti all'interferenza tra componenti di ponteggio e dispositivi di controllo/regolazione dell'impianto durante il montaggio e lo smontaggio di ponteggi (Tabella 8)
- eventi dovuti all'interferenza tra ponteggio e parti di impianto per errato posizionamento del ponteggio (Tabella 9)
- eventi dovuti a scarsa pulizia e scarso ordine del posto di lavoro (Tabella 10)

Nelle tabelle, per ogni documento, sono state riportate le informazioni relative a: le attività che si stavano svolgendo in relazione al ponteggio, le attrezzature o i sistemi coinvolti oltre al ponteggio, il tipo di evento, le conseguenze dell'evento, la sostanza coinvolta, la classificazione dell'evento, il riferimento all'archivio e all'ID della scheda.

Le attività lavorative relative al ponteggio durante le quali si sono verificati i problemi sono quelle di montaggio e smontaggio, di trasporto dei componenti, di errato posizionamento, di utilizzo di attrezzature di lavoro e di scarsa igiene sugli impalcati.

Le parti di impianto maggiormente coinvolte sono i dispositivi (valvole) e controlli (sensori), tubi e flessibili. Gli eventi maggiormente ricorrenti sono urti, rotture, danneggiamenti, deformazioni, vibrazioni. In quasi tutti i casi c'è stato un rilascio di sostanza pericolosa; in alcuni si è trattato di quantità minime che non hanno richiesto particolari interventi di emergenza, anche grazie ai dispositivi di allarme e segnalazione impiegati e che si sono prontamente attivati.

Nelle tabelle 8, 9, 10, la classificazione dell'evento analizzato è stata effettuata in base al tipo di conseguenza e alla quantità di sostanza pericolosa fuoriuscita.

Gli eventi estratti da eMARS e Aria, sono già stati classificati esplicitamente negli archivi stessi; gli eventi in eMARS come Incidenti Rilevanti (IR) secondo la definizione nella Direttiva 2012/18/EU [9]. Gli eventi riportati in Aria sono tutti incidenti con conseguenze.

Gli eventi estratti da EsOPIA sono stati classificati dagli Autori, come: Incidenti (I), quando gli eventi hanno avuto conseguenze; Incidenti Minori (IM), quando gli eventi hanno avuto conseguenze di minima entità; Quasi Incidenti (QI), quando gli eventi non hanno avuto conseguenze.

| Attività legate al ponteggio | Attrezzature e sistemi coinvolti | Evento | Conseguenze | Sostanza | Classificazione | Rif. Scheda |
|--------------------------------|---|---|-------------------------------------|-------------------------------------|-----------------|-------------|
| Trasporto componenti ponteggio | Carrello elevatore - Tubo bypass in quota | Rottura | Rilascio, incendio | Estremamente infiammabili, tossiche | IR | eMars_272 |
| | Ponteggio - tubo di sfiato | Urto - rottura tubo | Rilascio nube di gas | Etilene | IR | eMars_1121 |
| Montaggio ponteggio | Ponteggio - tubo alimentazione valvola di regolazione pressione | Urto e rottura tubo | rottura disco di rottura - rilascio | Acido cloridrico | I | Aria_35265 |
| | Ponteggio - tubazione per iniettare vapore | Urto e rottura raccordo tubazione | Perdita | <i>Dietanolamina (DEA)</i> | I | Aria_57383 |
| | Tubo ponteggio - sensore fine corsa della valvola | Urto | Rilascio | Facilmente infiammabile | I | ESOPIA_684 |
| | Valvola presa campione | Urto e apertura valvola | Rilascio | Non nominata | I M | ESOPIA_351 |
| | Tubo ponteggio - flessibile in PVC | Rottura/Urto | Fuoriuscita | Acido Cloridrico | I M | ESOPIA_2861 |
| Smontaggio ponteggio | Ponteggio - gruppo di regolazione | Appoggio di componenti su gruppo di regolazione - impedimento del funzionamento - Allarme - Verifica in campo | Nessuna | nessuna | QI | ESOPIA_2028 |

Tabella 8. Eventi dovuti all'interferenza tra componenti di ponteggio e dispositivi di controllo/regolazione dell'impianto durante il trasporto, il montaggio e lo smontaggio di ponteggi

È interessante osservare che gli eventi collegati all'attività di montaggio del ponteggio, dovuti all'urto con parti di impianto sono contenuti in tutti e tre gli archivi. Gli unici discriminanti sono la tipologia e la quantità della sostanza fuoriuscita, quindi l'entità delle conseguenze.

La Tabella 9 riporta i casi di interferenza dovuti all'errato posizionamento del ponteggio; anche in questo caso gli eventi estratti da Aria hanno avuto conseguenze di perdite importanti sia di prodotto che economiche e in un caso anche di inquinamento (Aria_59427). La scheda di esperienza operativa ESOPIA_5223 è il caso analogo in cui la conseguenza è stata minima (danneggiamento di un piccolo tubo), ma, se non fosse stato scoperto, avrebbe potuto portare a conseguenze più gravi.

Gli ultimi due casi sono simili, cioè la trasmissione di vibrazioni di macchinari attraverso il ponteggio. Nel caso contenuto in EsOPIA la conseguenza è stata la

caduta di una lampada, nel caso incidentale si è invece rotta la tubazione con la fuoriuscita di gasolio.

| Attività legate al ponteggio | Attrezzature e sistemi coinvolti | Evento | Conseguenze | Sostanza | Classificazione | Rif. Scheda |
|---------------------------------|---|--|-----------------------|------------------|-----------------|-------------|
| Errato posizionamento ponteggio | Ponteggio - valvola non ritorno | Blocco valvola | Fuoriuscita - scarico | fumi | I | Aria_54319 |
| | Ponteggio - rivestimento interno vasca | Danneggiamento rivestimento - corrosione | Perdita | Acido cloridrico | I | Aria_59172 |
| | Ponteggio - valvole a regolazione manuale | impedimento dell'accesso alle valvole | Perdita | glicole | I | Aria_59427 |
| | Ponteggio - tubo primario | Deformazione tubo | nessuna | nessuna | QI | ESOPIA_5223 |
| | Ponteggio - tubazione | Vibrazioni ponteggio - rottura tubazione | Perdita | Gasolio | I | Aria_52800 |
| | Essiccatore - Ponteggio - lampada | Contatto - Vibrazioni | Caduta lampada | nessuna | QI | ESOPIA_3274 |

Tabella 9. Eventi dovuti all'interferenza tra ponteggio e parti di impianto per errato posizionamento del ponteggio

La Tabella 10 riporta i casi dovuti a scarsa pulizia e scarso ordine del posto di lavoro, riconducibile alle errate procedure di lavoro o alla non corretta applicazione. In un caso perché non si è provveduto alla pulizia degli impalcati del ponteggio a fine lavoro, nell'altro perché è stata lasciata una lampada per illuminazione temporanea sempre sugli impalcati e sempre a fine lavoro. In entrambi i casi riportati, anche se con conseguenze di differente entità, si possono riconoscere analoghe cause.

| Attività legate al ponteggio | Attrezzature e sistemi coinvolti | Evento | Conseguenze | Sostanza | Classificazione | Rif. Scheda |
|------------------------------------|--|---|-----------------------|----------|-----------------|-------------|
| Scarsa igiene | Ponteggio - rifiuti | Rifiuti su impalcati di ponteggio - elevata temperatura | Incendio | nessuna | I | Aria_57829 |
| Utilizzo di attrezzature di lavoro | Ponteggio (smontaggio) - sfera (bonifica) - lampada per illuminazione temporanea | malfunzionamento lampada | Principio di incendio | nessuna | QI | EsOpIA_861 |

Tabella 10. Eventi dovuti a scarsa pulizia e scarso ordine del posto di lavoro

5.1 Lezioni apprese

Gli eventi analizzati sono collegati all'impiego di ponteggi; da essi, possono essere apprese le seguenti lezioni:

- L'impiego di ponteggi può interferire con il corretto funzionamento di componenti/dispositivi di impianto.
- Prima di montare un ponteggio, occorre valutare e verificare lo spazio libero a disposizione a terra e in elevato, considerando, oltre a quello necessario per il suo posizionamento, anche lo spazio per la movimentazione dei componenti del ponteggio durante il montaggio e lo smontaggio. Lo spazio deve essere tale da evitare urti e interferenze in generale con qualsiasi parte dell'impianto.
- Nel posizionamento del ponteggio occorre mantenere una distanza sufficiente tra lo stesso e parti di impianto in funzione, tale da evitare il contatto, garantire il corretto funzionamento e l'accessibilità di tutti i sistemi di sicurezza (DCS, controllo, regolazione, allarmi).
- Quando nella movimentazione degli elementi di ponteggio si utilizzano mezzi meccanici, per esempio carrelli elevatori, devono essere rispettate le distanze di sicurezza rispetto alle parti di impianto, eventualmente predisponendo delle protezioni passive che delimitino il passaggio sicuro.
- L'impiego di attrezzature e il deposito di materiali di risulta sugli impalcati del ponteggio può innescare incendi.
- Durante le lavorazioni sul ponteggio e a fine lavoro occorre mantenere in ordine e pulita l'area di lavoro, in particolare sugli impalcati dei ponteggi
- Occorre informare, in modo che siano consapevoli, i lavoratori addetti al montaggio/smontaggio e utilizzo dei ponteggi nei siti industriali dei particolari rischi derivanti da queste attività in relazione allo specifico contesto, anche con riferimento ai precedenti punti elenco.

6. Conclusioni

Lo studio comparato di eventi raccolti in differenti archivi ha permesso di evidenziare che eventi con analoghe cause possono comportare conseguenze più o meno gravi.

Lo studio dimostra che l'interferenza delle attrezzature per lavori in quota con parti di impianto può essere causa di quasi incidenti oppure concausa di incidenti rilevanti negli stabilimenti PIR.

Dall'analisi dei documenti, sono stati evidenziati gli eventi più significativi e indicate misure di prevenzione in forma di lezioni apprese.

L'attenzione verso gli incidenti minori o quasi incidenti potrebbe diminuire la possibilità del verificarsi di eventi maggiori.

Nel presente studio è stato in particolare evidenziato che l'utilizzo di ponteggi in siti caratterizzati dalla presenza di sostanze pericolose, richiede particolare attenzione.

Criticità sono riscontrabili nella fase di montaggio, smontaggio, trasporto, soprattutto dovute all'urto con parti di impianto, che provocano o potrebbero

provocare in questo contesto effetti ben più dannosi rispetto ad un altro contesto lavorativo (esempio generico cantiere edile). È necessario quindi che l'impresa di montaggio/smontaggio e utilizzo del ponteggio, consideri, nella valutazione dei rischi legati a tali attività, i rischi specifici del sito, forniti dal gestore e ne tenga conto nella predisposizione delle procedure di lavoro e nei documenti previsti (PiMUS, POS). Alcune misure di prevenzione in forma di lezioni apprese, sono indicate al paragrafo 5.

7. Bibliografia

- [1] d.lgs.105/2015. <https://www.mase.gov.it/pagina/la-direttiva-seveso-iii-decreto-legislativo-26-giugno-2015-ndeg105>
- [2] Saleh, J.H.; Saltmarsh, E.A.; Favaro, F.M.; Brevault, L. Accident precursors, near misses, and warning signs: Critical review and formal definitions within the framework of Discrete Event Systems. *Reliab. Eng. Syst. Saf.* 2013, 114, 148–154, doi:10.1016/j.ress.2013.01.006.
- [3] Phimister, J.R.; Oktem, U.; Kleindorfer, P.R.; Kunreuther, H. Near-miss incident management in the chemical process industry. *Risk Anal.* 2003, 23, 445–459.
- [4] Pirone A., Floridi E., Vazzana F., De Rosa A., Caruso G., Vairo T., Vallerotonda M.R., Ansaldi S.M., Geri F., Delle Site C. I permessi di lavoro nell'ambito dei sistemi di gestione della sicurezza negli stabilimenti a rischio di incidente rilevante. *Convegno Safap 2021*.
- [5] EsOplA - <https://www.inail.it/appintra/rcqi-fe> (accesso luglio 2023).
- [6] Ansaldi S.M., Agnello P., Pirone A., Vallerotonda M.R., 2021. Near miss archive: a challenge to share knowledge among inspectors and improve Seveso inspections. *Sustainability*. 2021. (Switzerland), 13 (15). <https://doi.org/10.3390/su13158456>.
- [7] Aria. <https://www.aria.developpement-durable.gouv.fr> (accesso luglio 2023).
- [8] eMARS. <https://emars.jrc.ec.europa.eu/en/emars/content> (accesso luglio 2023).
- [9] Direttiva 2012/18/UE del Parlamento europeo e del Consiglio, del 4 luglio 2012 , sul controllo del pericolo di incidenti rilevanti connessi con sostanze pericolose, recante modifica e successiva abrogazione della direttiva 96/82/CE del Consiglio Testo rilevante ai fini del SEE.
- [10] Ansaldi S.M., Fabiani F.M. Rischi correlati all'impiego di attrezzature per lavori in quota negli stabilimenti RIR. Note di Sicurezza. Inail. <https://www.inail.it/cs/internet/docs/alg-pubbl-rischi-corr-impiego-attrez-per-lavori-stab-rir.pdf>

Incidenti e quasi incidenti originati da guasti elettrici negli stabilimenti Seveso

M. R. Vallerotonda, A. Pirone

Inail - Dit

Abstract

Negli stabilimenti a rischio di incidente rilevante gli impianti elettrici sono strutture complesse e svolgono, insieme agli elementi di protezione e di sicurezza, un ruolo fondamentale per la continuità delle attività lavorative. Le normative relative agli impianti elettrici mirano a proteggere i lavoratori e i beni da folgorazioni, incendi ed esplosioni poiché i guasti elettrici possono causare il rilascio di sostanze pericolose. Gli impianti elettrici e i loro componenti sono anche critici ai fini della sicurezza, quindi, al pari delle altre apparecchiature e componenti, possono essere soggetti a fattori che ne compromettono il funzionamento. Il lavoro, partendo dall'analisi di documenti estratti da eMars (Major Accidents Reporting System), da ARIA (Analysis, Research and Information on Accidents) e dal repository Inail (EsOpIA), mira a valutare gli aspetti più critici e frequenti dovuti ai guasti elettrici che hanno o avrebbero potuto comportare il rilascio di sostanze pericolose. L'analisi è circoscritta agli impianti di processo, come raffinerie, stabilimenti chimici e petrolchimici, laddove la mancanza di energia elettrica può portare non solo ad interruzioni delle attività lavorative, ma anche a condizioni non sicure nella manipolazione di sostanze pericolose. Le cause più frequenti sono la mancata o inadeguata manutenzione, carenze nell'organizzazione o l'interruzione di energia elettrica e, quest'ultimo fattore, legato a blackout di rete o ad eventi naturali, evidenzia più di altri una interessante connessione tra problemi gestionali e impiantistici. Il presente articolo, individuando le cause più frequenti, è utile per indirizzare il lavoro degli ispettori durante le ispezioni e per rendere i gestori sempre più consapevoli delle realtà spesso articolate che gestiscono.

Keywords: pericolo di incidente rilevante, near miss, componenti ed impianti elettrici, sistema di gestione SGS PIR

1. Introduzione

Il guasto elettrico rappresenta una problematica presente in tutti i contesti industriali come causa di interruzione di funzioni e servizi e spesso come origine di incendi. Negli impianti soggetti alla normativa per il controllo del pericolo di incidenti rilevanti connessi con sostanze pericolose (cosiddetta "Seveso") la questione deve essere maggiormente attenzionata perché un guasto elettrico può innescare un incendio di entità tale da portare alla perdita di contenimento di una sostanza pericolosa. Oltre

a ciò, l'interruzione di corrente elettrica fa arrestare la dinamica dei sistemi (es. pompe, compressori), interrompe i flussi, causa danni alle apparecchiature e determina deviazioni incontrollate del processo. In ogni caso, indipendentemente dall'entità del guasto, le conseguenze possono essere significative; si pensi al malfunzionamento di un singolo cavo che può determinare l'interruzione della trasmissione del segnale con l'inevitabile compromissione della funzionalità di un sistema di controllo e la successiva deviazione di un processo fino al rilascio di sostanze pericolose. Nonostante gli impianti di processo siano progettati per resistere ai guasti elettrici, adottando criteri di ridondanza e rigorosi standard di sicurezza, sono comunque significativi gli eventi che vedono il malfunzionamento delle apparecchiature e non è inusuale che, quando si verifica un'interruzione di corrente delle reti di trasmissione e distribuzione, non siano garantite le regolari operazioni poiché l'alimentazione ausiliaria manca o non è disponibile. Ciò ha un impatto sui sistemi critici dell'impianto e invita a riflettere sul fatto che l'adeguatezza progettuale e gli adeguamenti tecnici non sempre preservano da incidenti. Tale affermazione è supportata nel presente lavoro dalla disamina di incidenti e quasi incidenti che hanno coinvolto apparecchiature elettriche.

2. Contesto di riferimento

In generale, le cause più frequenti di guasti sono riconducibili a vari fattori: l'invecchiamento dei sistemi, la mancanza o l'inadeguatezza della manutenzione, l'obsolescenza, l'interruzione dell'alimentazione derivante dalla trasmissione del segnale per malfunzionamento o dalle reti di distribuzione. Grattan e Nicholsson (2010) hanno studiato una panoramica delle apparecchiature elettriche a bassa e media tensione utilizzate per il controllo e la protezione dei motori elettrici nelle industrie di processo; i diversi sistemi sono stati classificati sulla base delle modalità di guasto e degli effetti utilizzati per quantificare le prestazioni. È dello stesso anno uno studio condotto dall'HSE, l'Autorità britannica per il controllo del pericolo di incidenti rilevante, che considera l'invecchiamento dei sistemi elettrici come parte essenziale della questione più generale del controllo dell'invecchiamento delle apparecchiature e degli impianti e fornisce indicazioni relativamente al ciclo di vita, all'ispezione e alla specifica manutenzione. Lo studio dell'HSE è stato e rimane un utile riferimento in materia per i gestori degli stabilimenti e le Autorità di controllo, a cui si aggiunge l'approccio della diagnostica predittiva che utilizza l'algoritmo basato sui dati per fornire lo stato di salute e vita utile residua del sistema elettrico critico, come discusso da Hofmeister et al. (2013). Un approfondimento anche sugli aspetti organizzativi e procedurali è stato fornito da Kallambettu e Viswanathan (2018) che hanno evidenziato come, in alcuni Paesi, le Autorità di regolamentazione impongono ai gestori di valutare e gestire i rischi derivanti dall'avaria delle apparecchiature elettriche e di disporre di una procedura che garantisca il funzionamento e la manutenzione dei sistemi di alimentazione elettrica e dei dispositivi di protezione. Va sicuramente precisato che, relativamente al tema della funzionalità dei sistemi di

sicurezza elettrica, regolata dalla norma (IEC 61511), non si riscontra, da parte dei gestori di impianti Seveso una costante adozione della stessa che, per altro, non include alimentazione, quadri, cavi e trasformatori, che sono coinvolti in molti guasti e incidenti. Di più recente attenzione sono le conseguenze derivanti da eventi naturali estremi (ad es. onde di calore, inondazioni, ecc.) che comportano l'interruzione delle reti elettriche di lunga durata e l'indisponibilità dell'alimentazione di back-up con la conseguenza che le operazioni regolari non sono garantite. Tale aspetto è particolarmente osservato nell'ambito della valutazione e gestione dei rischi di incidente rilevante e si lavora sempre di più per migliorare la resilienza del sistema contro le minacce naturali, Bragatto e al. (2019) and Falabretti e al. (2020). A livello europeo utili informazioni sono reperibili attraverso la raccolta di eventi riportata nel database ARIA e nell'archivio eMARS, specifico per gli incidenti rilevanti, che hanno come causa principale o sono riconducibili a guasti dell'alimentazione elettrica, riportandone la tipologia e l'apparecchiatura coinvolta. A livello nazionale, Vallerotonda e al. (2022) hanno condotto un'analisi degli eventi minori e dei quasi incidenti avvenuti negli stabilimenti di soglia superiore italiani soggetti al d.lgs. 105/2015 effettuando una classificazione secondo le evoluzioni che gli eventi stessi hanno avuto nella loro manifestazione e/o evoluzione: anomalie delle utenze di sicurezza dovute al guasto dei sistemi di controllo, casi di anomalie delle utenze di sicurezza che effettuano il processo, ma i dispositivi di blocco hanno funzionato correttamente evitando il rilascio di sostanze pericolose e casi in cui l'interruzione dell'alimentazione ha causato problemi alle apparecchiature e alle utenze di sicurezza ma senza insorgere difficoltà di processo.

3. Obiettivo

Il presente lavoro parte dai risultati ottenuti nello studio degli eventi incidentali (minori e quasi incidenti) che si sono verificati negli stabilimenti di soglia superiore italiani, riconducibili ad un guasto o malfunzionamento di tipo elettrico e che hanno o avrebbero potuto comportare il rilascio di sostanza pericolosa ed effettua una approfondita disamina relativamente ai settori industriali interessati, alle principali cause, ai componenti ed alle attrezzature coinvolte ed alle barriere di mitigazione intervenute o meno (paragrafo 4.1). Successivamente è effettuato un excursus degli eventi caratterizzanti il panorama nazionale e quelli registrati a livello europeo, tramite lo studio del MAHB nel 2021 e la banca dati ARIA (rispettivamente paragrafi 4.2 e 4.3). Segue un confronto dei risultati (paragrafo 5) finalizzato a produrre una panoramica della problematica oggetto di discussione che sia di supporto alla definizione di indirizzi organizzativi e tecnico-operativi per gli addetti ai lavori.

4. Incidenti rilevanti e quasi incidenti connessi a guasti e malfunzionamenti elettrici

In questo paragrafo sono presentati i risultati relativi allo studio dei quasi incidenti a livello nazionale e, successivamente, gli esiti dello studio del MAHB e di ARIA.

4.1 Malfunzionamenti e guasti elettrici negli stabilimenti Seveso nazionali: repository EsOpIA

La discussione riportata nel presente paragrafo si basa sulle informazioni tratte dal repository Inail, denominato EsOpIA (Operational Experience and Artificial Intelligence), relativo ad incidenti, quasi incidenti ed anomalie avvenuti negli stabilimenti di soglia superiore soggetti al d.lgs. 105/2015. L'archivio documentale Inail contiene circa 4.500 eventi significativi (in particolare quasi incidenti) occorsi negli stabilimenti di soglia superiore italiani dal 2000 ad oggi. Le informazioni sono tratte dalle schede delle esperienze operative compilate dai gestori degli stabilimenti previste durante le ispezioni ai sensi dell'art. 27 del d.lgs. 105/2015 e che richiedono di riportare gli eventi significativi occorsi negli ultimi dieci anni rispetto alla data di ispezione. I documenti vengono utilizzati per molteplici obiettivi, tra cui quello di estrarre le informazioni finalizzate a studi di approfondimento su tematiche legate a tecnologie note (Ansaldi et al. 2016), per i rischi emergenti (Ansaldi et al. 2018), o per sfruttare le conoscenze per migliorare l'attività di formazione e ispezione (Ansaldi et al. 2019). I dati estratti identificano gli eventi maggiormente ricorrenti e, pertanto, si rivelano utili per valutare l'opportunità di introdurre eventuali miglioramenti gestionali o impiantistici. Nel repository EsOpIA sono stati individuati 87 eventi che hanno visto il coinvolgimento di impianti e/o apparecchiature elettriche dal 2015 al 2020. Si riporta di seguito il dettaglio dei risultati, elaborati per le finalità di questo studio, relativamente ai settori industriali interessati, alle cause, i componenti ed attrezzature coinvolte ed alle barriere di mitigazione.

4.1.1 Settori industriali

Il settore dell'industria chimica è quello in cui è stato registrato il maggior numero di problematiche di tipo elettrico e dove gli eventi hanno avuto conseguenze in termini di perdita di contenimento (Grafico 1).

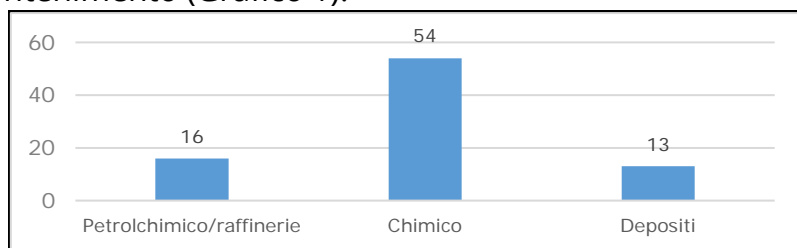


Grafico 1. Settori industriali.

In tali occasioni, si tratta di eventi con modeste conseguenze che non hanno comportato effetti rilevanti grazie al fatto che sono intervenute più o meno tempestivamente le barriere di prevenzione e mitigazione presenti in stabilimento. In

4 casi la causa è stata esterna (improvvisi e forti temporali), mentre in tre casi sono risultate guaste alcune apparecchiature (scheda dell'UPS, interruttore differenziale di rete, elettrovalvola). In altri tre casi, invece, è stata registrata una modesta perdita di olio a causa dell'errata manutenzione del trasformatore (2) e del compressore (1). In minor numero sono risultati i principi di incendio (4) dovuti a corto circuito (2) o guasto dell'attrezzatura coinvolta o, in un caso, ad interruzione esterna di energia elettrica che ha bloccato il generatore di vapore e contestualmente le valvole di sicurezza.

4.1.2 Principali cause tecniche ed organizzative

Una prima distinzione può essere effettuata tra problematiche dovute a cause esterne (37) come interruzioni di energia elettrica da rete/blackout, temporali e sbalzi di tensione e interruzioni legate a problematiche interne allo stabilimento (51) come manutenzione, rotture e guasti di attrezzature, corto circuito ed errore umano. Dai dati estratti emerge che tali eventi sono per lo più dovuti a cause interne e, quindi, riconducibili a carenze sia di tipo organizzativo che tecnico/impiantistiche. In dettaglio le cause maggiormente riscontrate nel Grafico 2.

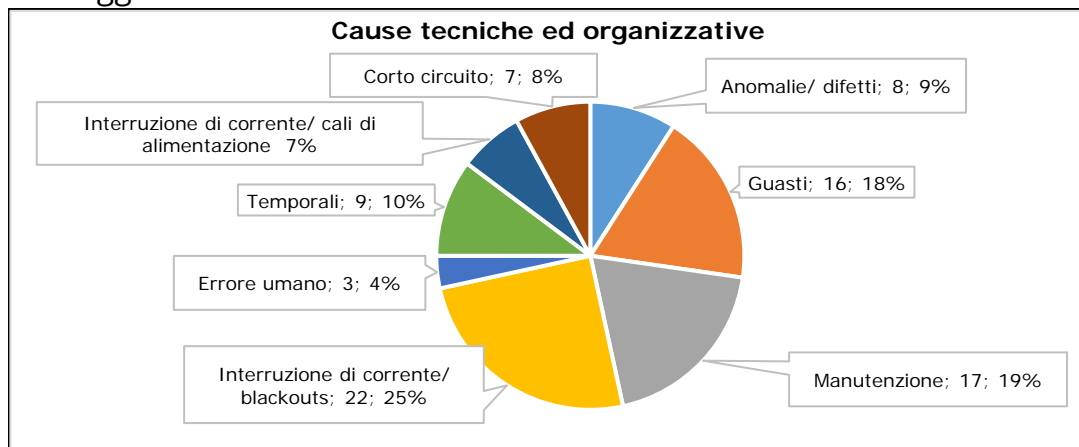


Grafico 2. Cause tecniche ed organizzative.

Per i problemi legati alla manutenzione e/o controlli (17) ci si riferisce al fatto che tale attività non è stata svolta o non è stata svolta secondo uno specifico programma o, peggio ancora, è stata svolta in modo errato. Ad esempio, in quattro casi è stato rilevato che a seguito di manutenzione o durante la manutenzione il trasformatore non ha funzionato e in due casi ha perso olio. In altri due casi la linea elettrica ha causato interruzione di energia elettrica poiché non era isolata e, quindi, non era stata mantenuta. In altri due casi il DCS non ha funzionato perché non era stato mantenuto. I guasti e le rotture (16) hanno riguardato per lo più attrezzature che non entrando in funzione hanno bloccato il processo o parte del processo impedendo la regolare funzionalità (UPS in 3 casi, pompe in 3 casi, compressore in 2 casi). Meno numerosi, ma sicuramente importanti sono gli eventi dovuti a corto circuito (7) avvenuti anche a causa del contatto tra cavi non isolati (2) e che hanno riguardato cabina o quadro elettrico e in due casi un'attrezzatura in funzione (imballatrice, motore elettrico). Solo in 3 casi, la causa è riconducibile ad un errore umano. Nei

documenti analizzati non mancano casi legati a sbalzi e variazione di tensione (6) che, seppure di lieve entità in termini di durata, hanno comportato problemi ai processi in atto coinvolgendo due volte l'aggitatore in funzione compromettendone l'attività; in altre due occasioni, invece, lo sbalzo di corrente ha fatto scattare l'intervento dell'UPS che, però, non ha funzionato. In termini di numerosità, tra le cause di guasti elettrici ci sono anche i fenomeni naturali (9), ossia i temporali e le anomalie e difetti di funzionamento delle attrezzature (8). Tra i guasti si riscontrano per lo più gli interruttori differenziali di cabine e quadri elettrici (4).

4.1.3 Componenti e attrezzature coinvolte

Il Grafico 3 riporta i componenti maggiormente coinvolti negli eventi analizzati; dopo i gruppi UPS (13), i componenti che, non funzionando, hanno compromesso il processo sono le pompe e i compressori (8) e gli agitatori (5). I primi perché sono risultati rotti (4) o privi di alimentazione per blackout (3); i secondi sono andati in blocco compromettendo il processo a causa di sbalzi di tensione (3).

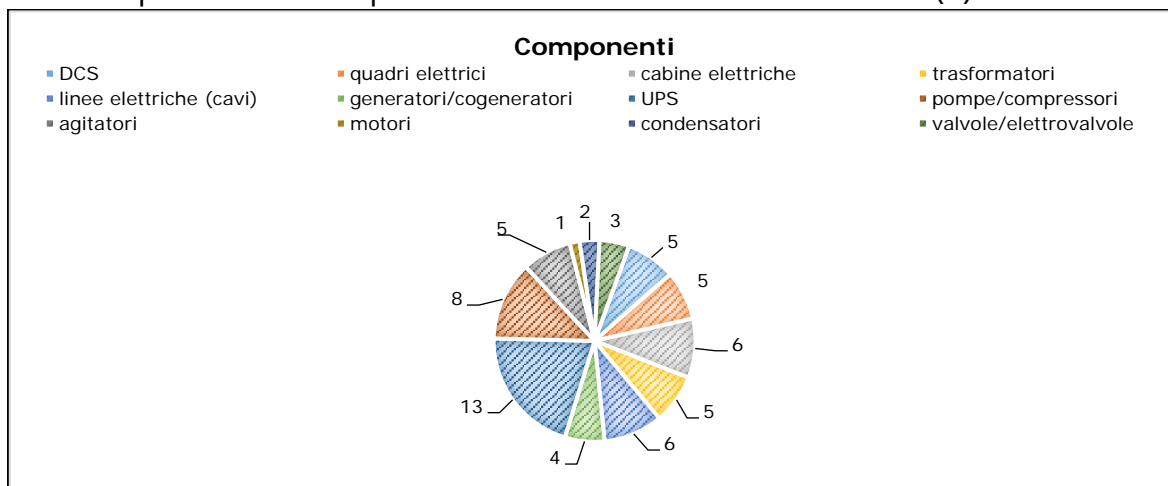


Grafico 3. Componenti.

Molte problematiche hanno coinvolto le cabine elettriche (6) che hanno interrotto l'erogazione di energia in alcuni casi per anomalia di funzionamento dell'interruttore generale (3) e in altri (2) a causa di una richiesta anomala di tensione (2). In sei eventi, invece, le linee elettriche hanno comportato l'interruzione di energia poiché non erano ben isolate (4) o perché erano state tranciate per errore umano durante lavori. Inoltre, in 5 casi sono stati coinvolti i quadri elettrici (2 volte a causa di corto circuito) che hanno di conseguenza interrotto l'alimentazione ad attrezzature e impianti. Negli eventi analizzati è, infine, emerso che sono stati spesso coinvolti i DCS (5) per errata manutenzione (2), manutenzione non effettuata (1) o errata progettazione (1) e i trasformatori (5) per manutenzione errata (4) e guasto (1).

4.1.4 Le barriere di mitigazione

Nel Grafico 4 è presentata la sintesi delle barriere di mitigazione intervenute o meno e la loro tipologia. La terza colonna riporta il numero dei casi in cui hanno funzionato o non funzionato più barriere insieme sia di tipo organizzativo che tecnico. Le barriere organizzative che hanno funzionato maggiormente sono l'adozione ed attivazione di

adeguate procedure di messa in sicurezza (3) e di emergenza (7), di manutenzione (1) e di bonifica (1) e l'efficace progettazione (1). Tra le barriere organizzative che, invece, hanno fallito sono state riportate l'errata progettazione (8), la non idonea o non implementata procedura di manutenzione (20), l'errata attivazione di procedure di emergenza (4) e di messa in sicurezza (3), di conduzione degli impianti in condizioni anomale (2) e di bonifica (1). Tra le barriere funzionanti di tipo tecnico/impiantistico sono stati rilevate il corretto intervento di dispositivi protezione (4) e del UPS (3), mentre tra quelle che hanno fallito maggiormente sono state riscontrate la mancanza sistemi allarme (2), il mancato funzionamento di UPS (2) e l'assenza di sistemi di protezione di impianto (1). Dall'analisi dei documenti si possono estrarre informazioni sulle migliorie di tipo tecnico/impiantistico e gestionale che i gestori hanno ritenuto opportuno introdurre. Nello specifico una delle misure tecniche necessarie a garantire la continuità di alimentazione durante lo svolgimento delle attività è quella di assicurare la presenza e funzionalità dell'UPS.

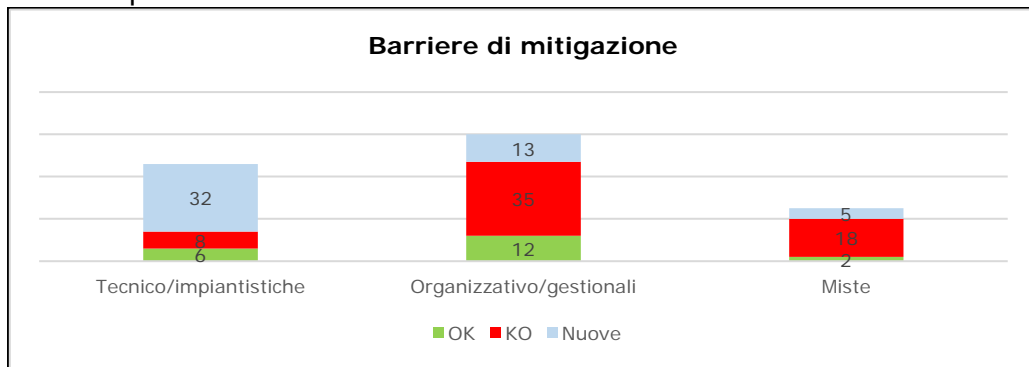


Grafico 4. Barriere di mitigazione.

In altri casi, invece, i gestori hanno ritenuto necessario provvedere ad installare sistemi di rilevamento parametri e di allarme (9), mentre altri in 8 casi hanno apportato modifiche più o meno importanti all'impianto. Tra le soluzioni di tipo organizzativo/gestionale sono state individuate come necessarie l'aggiornamento e/o l'implementazione, laddove assenti, di procedure (6) o di manutenzione e controlli delle attrezzature (7), mentre in 4 casi ci si è resi conto che era indispensabile potenziare la formazione dei lavoratori (4).

4.2 Malfunzionamenti e guasti elettrici negli stabilimenti Seveso europei: database e-MARS

Nel ventennio 1980-2020 sono stati registrati nel database eMARS 126 eventi (tra i circa 1.100 registrati) riconducibili a problematiche di tipo elettrico. In 90 di questi eventi la causa è stata ricondotta alla mancanza di alimentazione primaria con conseguenze in termini di vite umane (21 vittime e 9.500 feriti) e di danni materiali. Un focus è stato effettuato sui guasti legati all'interruzione di energia elettrica identificando, contestualmente, le tipologie, le apparecchiature coinvolte e le possibili

misure per prevenirli e mitigarli. I risultati sono riportati nel Grafico 5, tratto dallo studio.

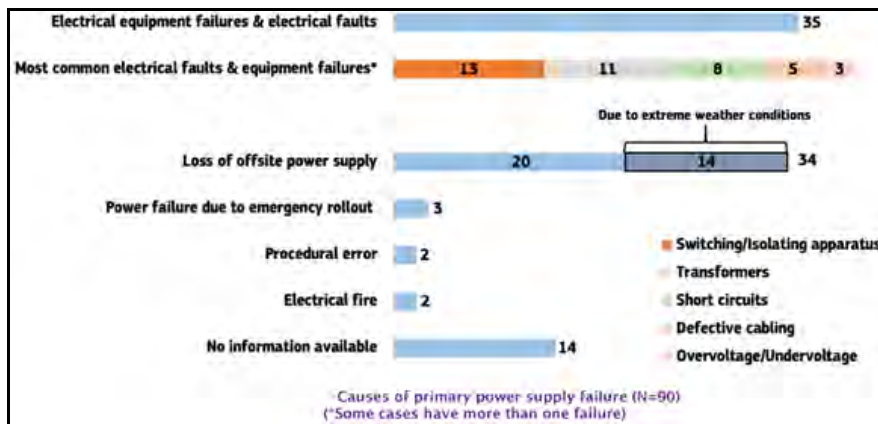


Grafico 5. MAHB 2021 Learning from incidents involving power supply failures
Bulletin No. 15

Lo studio riporta che 34 eventi sono stati dovuti ad una perdita di alimentazione elettrica pubblica; in 20 casi le interruzioni di corrente sono stati distinte tra blackout, con perdita totale di energia elettrica, e cali/sbalzi di tensione, per lo più disturbi legati a variazioni di tensione; mentre in 14 casi l'interruzione è stata causata da condizioni meteorologiche estreme. Gli incidenti hanno avuto una evoluzione a cascata che partendo dall'interruzione di corrente, è proseguita con un guasto e/o l'interruzione del processo fino ad arrivare alla perdita di contenimento. In 35 casi alla base dell'interruzione di alimentazione vi è stato il guasto di apparecchiature e/o componenti elettrici. Nello specifico: in 13 casi gli apparecchi elettrici di commutazione e isolamento non si sono aperti o chiusi; il guasto di trasformatori ed i cortocircuiti si sono verificati rispettivamente in 11 casi ed in 8 casi; in 5 casi si è avuta una installazione errata o una manutenzione insufficiente. Lo studio riporta un focus sui sistemi ridondanti che in 33 casi, seppur presenti, non hanno funzionato correttamente. In particolare, in 19 casi i generatori sono risultati guasti, in 7 casi è mancata la commutazione tra alimentazione primaria e sistemi di supporto, in 4 casi gli UPS sono risultati guasti, in altri 4 casi tali sistemi hanno subito cortocircuito e in 2 casi sono stati interessati da sovratensione o sottotensione. Il Grafico 6, tratto dallo studio, fornisce un ulteriore approfondimento, relativamente agli effetti sulle Utilities avvenuti anche in contemporanea, sui sistemi di raffreddamento (23 casi) e di vapore (10 casi). Sono riportate le attrezzature più colpite (principalmente reattori, ma anche forni e boiler), i componenti di processo più coinvolti (pompe, agitatori e valvole) e gli aspetti di sicurezza maggiormente critici, principalmente sistemi di rilevazione e monitoraggio, ma anche i sistemi antincendio e le comunicazioni. I dispositivi di sicurezza, come rilevatori di gas e monitoraggio dei sistemi (es. sensori di livello) non hanno funzionato a causa di interruzione di corrente in 10 casi, mentre in 4 casi la mancanza di alimentazione non ha permesso che entrassero in funzione gli impianti

antincendio e in altri quattro casi è stata interrotta la comunicazione interna ed esterna allo stabilimento.

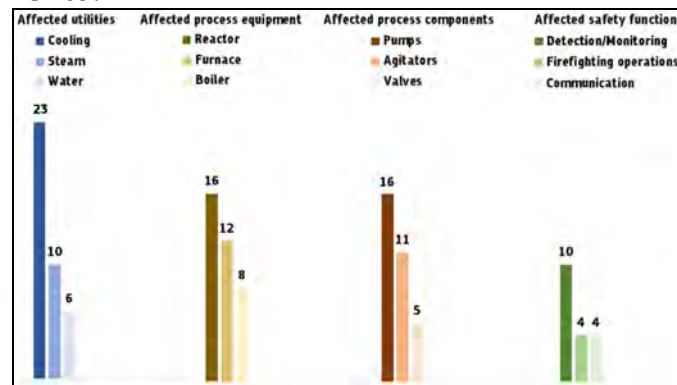


Grafico 6. MAHB 2021 Learning from incidents involving power supply failures Bulletin No. 15.

4.3 Dati estratti da ARIA

Il database ARIA raccoglie gli incidenti che sono stati o avrebbero potuto essere dannosi per la salute umana, la sicurezza pubblica o l'ambiente relativi ad attività varie, non esclusive degli stabilimenti Seveso. Per le finalità del presente lavoro, nel periodo 1980-2020, sono state estratte ed analizzate 409 schede che riportano riferimenti al settore elettrico, di queste 93 riconducono ad eventi, maggiori e minori, legati a problematiche/guasti elettrici. Il Grafico 7 presenta quali sono i settori industriali maggiormente coinvolti.

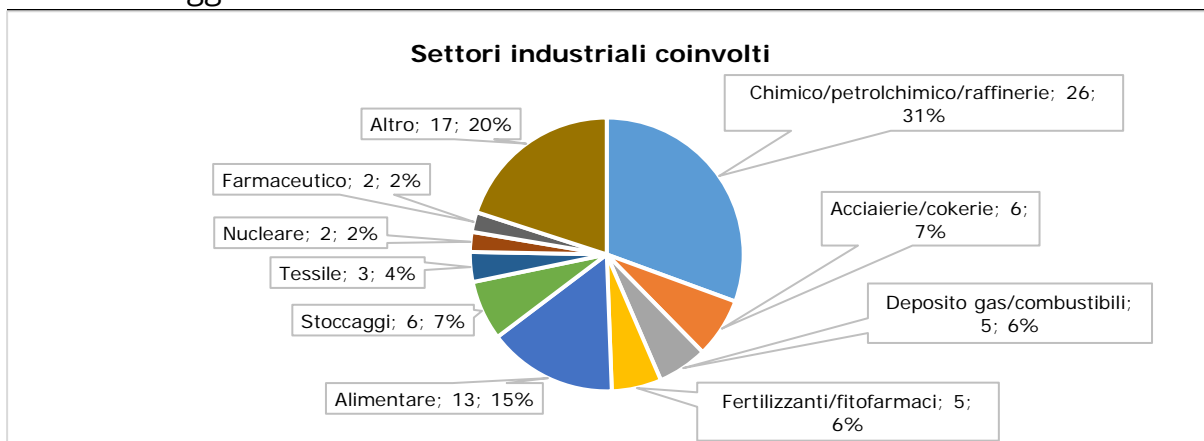


Grafico 7. Settori industriali coinvolti.

In termini di conseguenze è stato possibile rilevare la numerosità degli eventi intesi come esplosioni, incendi, rilasci ed allagamenti distinguendoli in base al coinvolgimento o meno di sostanze pericolose. E' emerso che sono stati più numerosi quelli con sviluppo di incendi (22 casi) e di rilasci tossici (20 casi). La maggior parte degli eventi analizzati hanno avuto cause interne, mentre le cause esterne (circa il 30%) sono legate ad eventi naturali e di tipo tecnico/impiantistico. Le prime sono dovute a fulmini (52%) e forti piogge/bombe d'acqua (24%); le seconde ad interruzione totale di alimentazione elettrica da rete (24%). È stato valutato l'impatto

delle cause associate agli eventi distinguendole per tipologia tenendo conto del coinvolgimento o meno di attrezzature e componenti elettrici o di misure gestionali ed organizzative disattese o non adeguate (Grafico 8). Il peso maggiore è stato attribuito alle interruzioni totali da rete (21%) e ai guasti dei componenti elettrici (17%), intesi come sensori e valvole, seguiti da cause legate alla manutenzione, risultata disattesa o errata (16%).

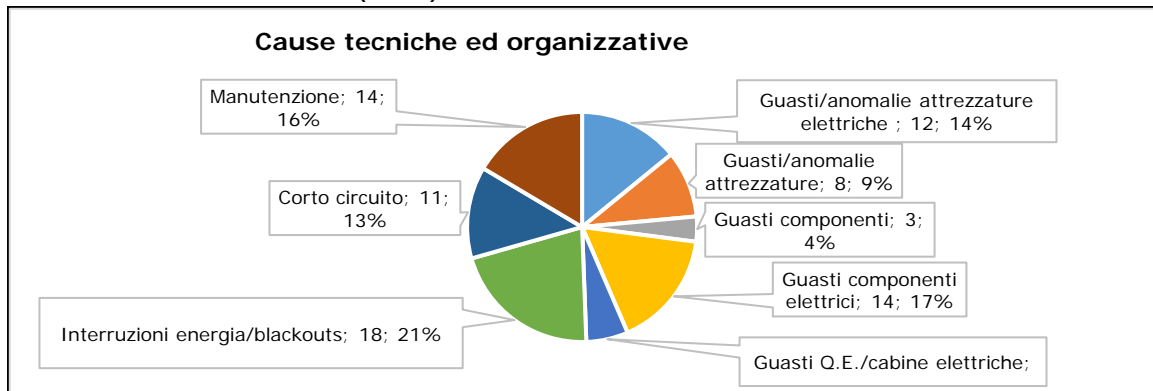


Grafico 8. Cause tecniche ed organizzative.

E' stato approfondito il ruolo delle barriere di mitigazione ed il loro corretto funzionamento distinguendo tra quelle necessarie e quelle implementate successivamente. Le barriere miste (tecnico/impiantistico e/o organizzativo/procedurale), come, ad esempio, le attività di manutenzione e le procedure di emergenza e bonifica, sono intervenute correttamente in 25 casi e hanno fallito in altri 26 casi. A seguito degli incidenti e della loro analisi, i gestori hanno ritenuto necessario implementare e potenziare in 26 casi le barriere organizzativo/gestionali, ossia procedure specifiche e formazione dei lavoratori, e in 23 casi hanno introdotto o sostituito sistemi di protezione, controllo e di allarme.

5. Confronto tra i risultati

I risultati ottenuti dall'analisi delle informazioni contenute nelle tre banche dati descritte nel precedente paragrafo sono stati confrontati le cause e gli aspetti che li hanno maggiormente caratterizzati. Si deve evidenziare sin da subito che che gli eventi valutati in ambito JRC sono incidenti rilevanti, quelli estratti dal database ARIA includono varie tipologie di eventi, non necessariamente ricompresi nel settore del pericolo di incidente rilevante, e quelli estratti dal repository EsOplA riguardano principalmente incidenti minori e quasi incidenti. Il periodo considerato sia da JRC che da Aria è relativo agli anni 1980/2020 e la numerosità dei campioni estratti è confrontabile (90 e 93 eventi rispettivamente), mentre il repository EsOplA si riferisce essenzialmente agli eventi dal 2000 al 2020 con una maggiore attenzione al secondo decennio derivante da una migliore compilazione delle schede fornite dai gestori. Nonostante un periodo di riferimento più breve, il repository italiano fornisce un numero di dati maggiore (87 eventi); questo aspetto si può ricondurre, ad una maggiore attenzione dei gestori incoraggiata nel tempo da un sistema di controlli piuttosto stringente che richiede la costante e continua registrazione ed analisi anche

dei casi minori. Focalizzando la riflessione sulle cause, emerge che le interruzioni da blackout elettrico sono ancora sottovalutate e sono causate dalla combinazione di più carenze come l'elevato utilizzo della rete, l'elevata richiesta di energia e la manifestazione di anomalie dovute all'invecchiamento del materiale elettrico. Le reti elettriche, infatti, risultano spesso datate e nel corso della loro vita subiscono modifiche e adeguamenti affinché siano resilienti e rispondano a sollecitazioni di vario tipo. Sono numerosi i casi in cui non è garantita la continuità di alimentazione agli impianti e alle attrezzature attraverso la presenza ed affidabilità di UPS e sistemi di cogenerazione. Infatti, tra i componenti risultati maggiormente coinvolti da anomalie elettriche sono risultati proprio i gruppi di continuità che, quando presenti, non sono risultati funzionanti. Nel settore chimico e petrolchimico le problematiche di tipo elettrico influiscono direttamente sui processi complessi in atto e tutto ciò ha ripercussioni sulla tempistica delle attività stesse comportando perdite economiche e, nei casi peggiori, sulle condizioni di sicurezza degli impianti con possibili perdite di contenimento di sostanze pericolose. Il confronto tra le banche dati, quindi, consente anche di fare una distinzione tra gli eventi che hanno comportato una semplice interruzione delle attività in corso da quelle che hanno determinato conseguenze, seppur lievi, per l'ambiente e i lavoratori. È confermato, pertanto, il trend degli incidenti causati da guasti di attrezzature e componenti elettrici, intesi come apparecchi di commutazione e isolamento, trasformatori, compressori, ma anche sensori e valvole. In numerosi casi i gestori hanno ritenuto necessario apportare modifiche valutando l'opportunità attuare miglioramenti di tipo tecnico/impiantistico. Non meno necessarie sono state ritenute le attività per rafforzare controlli e manutenzioni sui componenti elettrici o, ancora, per potenziare l'addestramento del personale su scenari di arresto e di emergenza.

6. Conclusioni

Il lavoro ha permesso di confermare che la problematica degli incidenti dovuti ai guasti elettrici è di grande attualità; la consistenza degli eventi, nonché l'andamento degli stessi, rappresenta un aspetto che non può essere trascurato nella gestione degli aspetti tecnici ed organizzativi degli impianti. ai risultati è emerso che i Gestori, grazie all'analisi delle cause iniziatrici, sono stati messi nella condizione di sviluppare una maggiore sensibilità rispetto alla problematica dei guasti elettrici e, contestualmente, hanno potuto considerare l'opportunità/necessità di potenziare le barriere di mitigazione adottate per prevenire gli eventi. In tal modo è stato confermato che anche la strumentazione elettrica ed elettronica è soggetta al deterioramento fisico come ogni altra attrezzatura e, quindi, fenomeni locali come l'ossidazione, vibrazioni, urti e sovratensioni possono comprometterne il normale funzionamento. Pertanto, al fine di tenere sotto controllo le condizioni operative di tale strumentazione, analogamente per i sistemi di contenimento, deve essere

implementato un piano di manutenzione e controlli anche ai fini della gestione dell'invecchiamento.

Ringraziamenti

La memoria è stata elaborata con il contributo della Dott.ssa Silvia Maria Ansaldi.

Bibliografia

- [1] Ansaldi, S.M., Agnello, P., Bragatto, P.A., 2016. Incidents triggered by failures of level sensors, CET Chemical Engineering Transactions, 53.
- [2] Ansaldi, S.M., Pirone A., Vallerotonda M.R., Bragatto, P.A., Agnello, P. 2018. How inspections outcomes may improve the foresight of operators and regulators in Seveso industries, CET Chemical Engineering Transactions, 67.
- [3] Ansaldi, S.M., Pirone A., Vallerotonda M.R., Agnello, P., Bragatto, P.A. 2019. Near misses from the Seveso inspections: use of knowledge based methods for safety improvement, CET Chemical Engineering Transactions, 75.
- [4] Bragatto, T., Cresta, M., Cortesi, F., Gatta, F.M., Geri, A., Maccioni, M., Paulucci, M. 2019. Assessment and Possible Solution to Increase Resilience: Flooding Threats in Terni Distribution Grid. *Energies* 2019, 12, 744 <https://doi.org/10.3390/en12040744>.
- [5] Falabretti, D., Lo Schiavo, L., Liotta, S., Palazzoli, A. 2020. A Novel Method for Evaluating the Resilience of Distribution Networks during Heat Waves. *International Journal of Electrical and Electronic Engineering & Telecommunications*, Vol. 9, No. 2, pp. 73-79, March 2020. <http://dx.doi.org/10.18178/ijeetc.9.2.73-79>
- [6] Kallambettu, J., & Viswanathan, V. (2018). Application of functional safety to electrical power equipment and systems in process industries. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 56, 155-161.
- [7] Grattan, D. Nicholson, S 2010 Integrating switchgear breakers and contactors into a safety instrumented function *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 23 784- 795.
- [8] MAHB 2021 Learning from incidents involving power supply failures *Chemical Accident Prevention & Preparedness L. L. Bulletin No. 15* <https://minerva.jrc.ec.europa.eu/en/shorturl/minerva/>
- [9] ARIA (Analysis, Research and Information on Accidents), <https://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/?lang=en&s=> (accesso 31/03/2022).
- [10] eMARS (Major Accident Reporting System), <https://emars.jrc.ec.europa.eu/en/emars/accident/search> (accesso 31/03/2022).

Analisi della completezza dei report di quasi-incidente nella direttiva Seveso

F. Simone ², P. Agnello ¹, S. M. Ansaldi ¹, G. Di Gravio ², R. Patriarca ², M. Tronci ²

¹Inail - Dit

²Università di Roma "La Sapienza" - Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Aerospaziale

Abstract

Gli incidenti industriali sono eventi, fortunatamente poco frequenti, che però forniscono la possibilità di accedere a un ampio insieme di informazioni utili per analisi operative e occupazionali di sicurezza. Al di là degli incidenti gravi, accadono anche numerosi episodi minori definiti quasi-incidenti, ovvero eventi con la potenzialità di generare un incidente che però non hanno condotto ad un epilogo disastroso. Se opportunamente documentati, tali quasi-incidenti contengono un potenziale informativo paragonabile a quello ottenibile a valle di un incidente rilevante. Basandosi su questa ipotesi, questo lavoro presenta la definizione di una metrica di completezza dei report di quasi incidente. La metrica è stata definita tramite un questionario sottoposto a vari stakeholder operanti nei settori Seveso e quindi coinvolti nella generazione di questa reportistica. L'analisi di completezza richiede la capacità di elaborare un grande contenuto di informazioni "nascoste" all'interno di numerosissimi documenti di testo, di provenienza varia, non standardizzati, e apparentemente sconnessi tra loro. In tal senso, è stato utilizzato un grafo della conoscenza, i.e., knowledge graph: una struttura analitica che modella le informazioni contenute nei documenti utilizzando le regole semantiche di un'ontologia. Il grafo permette un'analisi dettagliata dell'intera base dati, attraverso la definizione di "percorsi" critici e combinazioni di variabili particolari. Questo lavoro presenta un'analisi del database a grafo, rimarcando l'importanza del processo di raccolta ed analisi della documentazione dei quasi incidenti.

Keywords: ontologia di sicurezza, grafo di conoscenza, impianti industriali, gestione del rischio.

1. Introduzione

Negli ultimi anni, diversi studi hanno confermato la crescente riduzione del numero di incidenti rilevanti legati alle operazioni industriali. Questi eventi, però, portano con loro un grande potenziale informativo che può essere sfruttato per imparare dal passato ed evitare di sbagliare nuovamente in futuro. Lo studio ex post di questi incidenti è da sempre stato fondamentale per migliorare la sicurezza industriale.

D'altro canto, la loro diminuzione – se da un lato è, per ovvi motivi, positiva – rende difficile il cammino per migliorare ulteriormente la sicurezza.

Esistono però, una serie di eventi meno eclatanti, con conseguenze minori, il cui contenuto informativo rimane spesso sottovalutato. Questo lavoro si fonda sull'ipotesi che questi eventi minori contengano una serie di informazioni nascoste utili a svelare meccanismi eziologici spesso più complessi di quelli ottenibili in maniera diretta dall'analisi di un incidente rilevante. I cosiddetti quasi-incidenti possono fornire preziose indicazioni per la gestione della salute e della sicurezza, favorendo un miglioramento della sicurezza che – potenzialmente – sopprime alla mancanza di ulteriori dati relativi agli incidenti rilevanti [1]. Con "quasi-incidente" si identificano tutti quegli eventi che avrebbero potuto causare un incidente, un danno alla salute o addirittura una morte, ma che per qualche motivo non hanno avuto un epilogo disastroso [2]. Su questa base, un quasi-incidente può essere visto come un evento con il potenziale di diventare un altro evento con conseguenze ben maggiori. Questo nuovo punto di vista sottolinea la necessità di monitorare costantemente i pericoli, i rischi e le operazioni routinarie, raccogliendo informazioni su qualsiasi evento "avverso" sebbene abbia apparentemente avuto conseguenze minori. La segnalazione dei quasi-incidenti rappresenta un valore aggiunto, in quanto consente di anticipare i guasti, di esplorare i fattori causali, di verificare l'efficacia delle barriere di sicurezza, ma anche di apprendere i potenziali adattamenti e le strategie di risposta per evitare conseguenze più gravi. L'importanza dei quasi-incidenti acquista particolare rilevanza soprattutto per quegli ambienti industriali che si occupano di attività legate allo stoccaggio, alla manipolazione, alla produzione o al semplice utilizzo di sostanze pericolose: le cosiddette industrie Seveso [3]. Il termine "Seveso" si riferisce alla Direttiva Seveso III dell'Unione Europea [4], recepita nella legislazione italiana nel d.lgs.105/2015 [5], che identifica gli ambienti industriali ad alto rischio per quanto riguarda la sicurezza, la salute e l'ambiente in quanto coinvolgono sostanze chimiche pericolose. La Direttiva Seveso interessa diversi ambienti industriali, tra cui le raffinerie, l'industria chimica e petrolchimica, la farmaceutica, o anche le aziende coinvolte nella lavorazione di metalli ed esplosivi. Questa vasta differenziazione nelle operazioni associate ai settori Seveso rende difficile un'analisi di insieme volta ad imparare dai quasi-incidenti, nonostante lo scopo ultimo di queste realtà industriali sia condiviso.

A tal proposito, il presente lavoro presenta un metodo di analisi per esplorare in modo sistematico i dati raccolti delle segnalazioni di quasi incidenti raccolti dalle industrie Seveso. Per raggiungere questo obiettivo, questi ultimi saranno rappresentati in un grafo di conoscenza (anche knowledge graph) che permette l'analisi di una grande quantità di dati anche differenziati tra loro. L'analisi si basa sul concetto di completezza dei rapporti come indicatore principale delle prestazioni della gestione della sicurezza. Di conseguenza, il grafo di conoscenza è stato pesato attraverso dei questionari dapprima progettati sulla base di principi decisionali multicriteriali e successivamente somministrati ad esperti del settore Seveso.

La domanda di ricerca di questo lavoro può essere, quindi, formulata come segue: "In che misura i grafici della conoscenza possono supportare una meta-analisi della completezza dei report di quasi-incidenti raccolti nelle industrie Seveso?". Ci si basa sulla nozione di meta-analisi di sicurezza per identificare un tipo di ricerca che utilizza un approccio sistematico per combinare statisticamente una gran mole di dati di quasi-incidente per ottenere una panoramica sistemica sulla gestione della sicurezza. Il resto del documento è organizzato come segue. La Sezione 2 introduce il metodo alla base del presente lavoro, che viene poi dettagliato in Sezione 4 con degli esempi di analisi e relativi risultati preliminari. La Sezione 4 conclude infine il lavoro, con riflessioni e suggerimenti per un utilizzo pratico e continuo di questi strumenti durante le operazioni di ispezione.

2. Metodo

In questa sezione si presentano brevemente i fondamenti metodologici utilizzati per guidare l'analisi dei report di quasi-incidente attraverso la completezza del loro contenuto informativo. La metodologia si avvale della tecnologia dei grafi di conoscenza per modellare i dati raccolti e la estende attraverso un meccanismo di ponderazione volto ad assegnare un valore di rilevanza a ciascun tipo di informazione che una segnalazione può contenere. In sintesi, questa sezione contiene una formalizzazione della struttura a grafo, e le nozioni utili per l'approccio di meta-analisi di sicurezza attraverso la definizione della metrica di completezza.

2.1. Un grafo per modellare i quasi-incidenti

Un grafo G può essere formalmente definito come una struttura contenente dati organizzati in nodi (o vertici) e relazioni (o spigoli) che li collegano. Ogni nodo N_n è definito come un oggetto multidimensionale dotato di un'etichetta L_n^N ed una serie di proprietà $p_{1,n}^N, p_{2,n}^N, \dots, p_{i,n}^N$.

Allo stesso modo, una relazione R_m è definita come un oggetto multidimensionale definito da un nodo di partenza N'_m , un nodo terminale N''_m , un'etichetta L_m^R , ed una serie di proprietà $p_{1,m}^R, p_{2,m}^R, \dots, p_{j,m}^R$ ad essa assegnate.

Il knowledge graph utilizzato in questa ricerca si basa su un precedente contributo in [6], il lettore può trovare in quell'articolo una spiegazione più dettagliata di questo paragrafo. Il knowledge graph sfrutta le regole semantiche dell'ontologia per modellare le segnalazioni di quasi-incidente pubblicata in [7], brevemente discussa di seguito. Si noti che le etichette dei nodi (L_n^N) e relazioni (L_m^R) saranno indicate con lettere maiuscole in corsivo, mentre le loro proprietà ($p_{i,n}^N$) e ($p_{j,m}^R$) con lettere minuscole in corsivo. Per quanto riguarda i nodi, sono state identificate nove diverse etichette, a seconda delle quali, i nodi hanno diverse proprietà. Le etichette dei nodi e le proprietà che ne derivano sono le seguenti:

- *INDUSTRIAL_SECTOR*: identifica i nodi contenenti dati riguardanti il settore industriale in cui opera lo stabilimento che redige la segnalazione del quasi-

incidente. Questi nodi hanno una sola proprietà: *industrial_sector_id* che specifica il settore industriale legato alla direttiva Seveso.

- **ESTABLISHMENT**: identifica i nodi contenenti dati sullo stabilimento industriale da cui è stata raccolta la segnalazione di quasi-incidente. Questi nodi hanno tre proprietà: (i) *establishment_id*, che è un identificatore unico per lo stabilimento industriale; (ii) *location_region*, che contiene la regione in cui opera lo stabilimento industriale; (iii) *location_district*, che contiene la provincia in cui opera lo stabilimento industriale.
- **DOCUMENT**: identifica i nodi che contengono dati su uno specifico documento (solitamente un documento testuale in formato pdf) di segnalazione di quasi-incidente. I nodi con etichetta **DOCUMENT** hanno tre proprietà: (i) *document_id*, che è un identificatore univoco per uno specifico rapporto di quasi-incidente e consiste nel nome del file pdf di origine; (ii) *collection_date*, che contiene l'anno in cui il rapporto di near miss è stato raccolto dall'autorità preposta all'ispezione; (iii) *occurrence_date*, che contiene l'anno in cui si è verificato l'evento di quasi-incidente descritto nel rapporto.
- **EVENT**: identifica i nodi che contengono dati su un particolare evento che si è verificato nell'occorrenza del quasi-incidente. I nodi con etichetta **EVENT** hanno due proprietà: (i) *value*, che include una o più parole estratte dal testo del file pdf che rappresenta l'occorrenza di un evento, e (ii) *type*, che specifica la tipologia di evento descritto nel rapporto, che può essere "Loss" (i.e., perdita), "Failure" (i.e., guasto), "Deterioration" (i.e., deterioramento), "Major" (i.e., particolarmente rilevante) o "Success" (i.e., evento positivo di successo).
- **ACTIVITY**: identifica i nodi che contengono dati sull'attività svolta quando si è verificato il quasi-incidente. I nodi con etichetta **ACTIVITY** hanno un'unica proprietà *value*, che include una o più parole estratte dal testo del file pdf che sono state identificate come attività.
- **APPARATUS**: identifica i nodi che contengono dati su un'apparecchiatura industriale coinvolta nel quasi-incidente. I nodi con etichetta **APPARATUS** hanno due proprietà: (i) *value*, che contiene una o più parole estratte dal testo del file pdf che sono state identificate come apparecchiature, e (ii) *type*, che specifica il tipo di apparecchiatura riportata nel rapporto, può essere "Equipment" (i.e., attrezzatura) o "Component" (i.e., componente di un'attrezzatura).
- **SUBSTANCE**: identifica i nodi contenenti dati su una specifica sostanza coinvolta nel quasi-incidente. I nodi con etichetta **SUBSTANCE** hanno un'unica proprietà *value* che contiene una o più parole estratte dal testo del file pdf che sono state identificate rappresentative di una sostanza.
- **PEOPLE**: identifica i nodi contenenti dati relativi al ruolo di una persona (o di un gruppo di persone) che è stata coinvolta nel quasi-incidente. I nodi con l'etichetta **PEOPLE** hanno un'unica proprietà *value*, che contiene una o più parole estratte dal testo del file pdf che sono state identificate come riferite a fattori umani.

- *BARRIER*: identifica i nodi contenenti dati relativi alle barriere di sicurezza (siano esse tecniche, siano esse organizzative) che si sono attivate – o meno – quando si è verificato il quasi-incidente. I nodi con l'etichetta *BARRIER* hanno due proprietà: (i) *value*, che contiene una o più parole estratte dal testo del file pdf che sono state identificate come barriera, e (ii) *type*, che specifica il tipo di barriera descritta nel rapporto, che può essere "Technical" (i.e., tecnica) o "Organizational" (i.e., organizzativa).

In maniera simile, sono state identificate sette diverse etichette per le relazioni. Nessuna proprietà è invece specificata per quest'ultime. Le etichette delle relazioni sono:

- *BELONGS_TO*: identifica un collegamento tra uno stabilimento industriale e un settore industriale.
- *FROM*: mappa la relazione tra i documenti e lo stabilimento in cui sono stati redatti/raccolti.
- *CONTAINS*: mette in relazione tutte le informazioni contenute in un documento (nodi con etichette *EVENT*, *ACTIVITY*, *APPARATUS*, *SUBSTANCE*, *PEOPLE*, *BARRIER*) con il corrispondente nodo etichettato come *DOCUMENT*.
- *RELATED_TO*: è una relazione generica tra due informazioni contenute in un report.
- *PART_OF*: descrive una connessione fisica tra due elementi del report. Di conseguenza, può essere utilizzata per mettere in relazione tra loro nodi con etichetta *APPARATUS* e nodi con *BARRIER*.
- *INVOLVES*: mette in relazione un'informazione con un nodo con etichetta *SUBSTANCE*.
- *CAUSES*: indica una connessione di causa-effetto tra due nodi e punta sempre a un nodo con etichetta *EVENT*.

2.2. Completezza dei report di quasi-incidente

La metrica di completezza dei report di quasi-incidente è definita attraverso l'utilizzo dell'Analytical Hierarchy Process (AHP), una metodologia che ha lo scopo di supportare un processo decisionale nella ricerca della soluzione migliore in base a un insieme finito di K criteri [8]. Per inquadrare il problema decisionale dell'AHP, è necessario selezionare un obiettivo, un criterio e le alternative che ne contribuiscono. Nell'ambito di questa ricerca, l'obiettivo è stato definito come "massimizzare la completezza di un report di quasi-incidente" (misura rappresentativa dell'utilità che il documento acquisisce per le analisi di sicurezza); i criteri sono stati identificati nei diversi tipi di informazioni che il compilatore può inserire (etichette dei nodi); e le alternative altro non sono che le parole che il compilatore può utilizzare per rappresentare tali informazioni. In questo lavoro, le alternative sono state trascurate poiché: (i) nel knowledge graph sono presenti più di 2000 diverse alternative, rendendone quasi impossibile la valutazione attraverso interviste con esperti; (ii) ogni parola (contenuta della proprietà *value*) è stata assunta avere lo stesso valore in termini di completezza. Sulla base di queste premesse, il modello ontologico descritto

in Sezione 2.1 fornisce il numero totale di K criteri che è pari a 9. Tuttavia, in termini di completezza del report di quasi-incidente, è opportuno considerare solo le etichette relative al contenuto del report stesso, ossia *EVENT*, *ACTIVITY*, *APPARATUS*, *SUBSTANCE*, *PEOPLE*, *BARRIER*, imponendo $K = 6$.

Di conseguenza, si è sottoposto ad un gruppo di sei esperti il questionario basato sulla metodologia AHP. I sei esperti sono stati selezionati tra ricercatori nell'ambito della sicurezza industriale, ispettori Seveso, e professionisti impiegati nella gestione della sicurezza di stabilimenti Seveso. Il questionario ha previsto l'assegnazione, da parte degli esperti, di un punteggio a ciascun criterio attraverso delle comparazioni a coppie. Il risultato delle interviste ha permesso la definizione di sei matrici $K \times K$ (i.e., una per rispondente) contenenti il peso di ciascun criterio rispetto agli altri (comparazione a coppie). Le sei matrici sono poi state raggruppate in un'unica matrice di comparazione A con elementi pari alla media geometrica degli elementi nelle matrici individuali. Il risultato è presentato di seguito:

$$A = \begin{pmatrix} 1.00 & 1.38 & 0.86 & 0.36 & 1.63 & 0.84 \\ 0.72 & 1.00 & 1.18 & 0.44 & 2.18 & 1.25 \\ 1.16 & 0.84 & 1.00 & 0.51 & 1.07 & 0.68 \\ 2.81 & 2.29 & 1.97 & 1.00 & 5.52 & 1.90 \\ 0.61 & 0.46 & 0.93 & 0.18 & 1.00 & 0.36 \\ 1.18 & 0.80 & 1.48 & 0.53 & 2.81 & 1.00 \end{pmatrix} \quad (1)$$

in cui le righe (e le colonne) riferiscono, in ordine, ai criteri: *ACTIVITY*, *APPARATUS*, *BARRIER*, *EVENT*, *PEOPLE*, *SUBSTANCE*.

La consistenza dei risultati ottenuti è valutata attraverso:

$$CR = \frac{1}{RI_K} \cdot \frac{\lambda_{max} - K}{K - 1} = \frac{1}{1.25} \cdot \frac{6.13 - 6}{6 - 1} \cong 0.02 \quad (2)$$

in cui RI_K è la consistenza media stimata su un insieme sufficientemente largo di matrici di comparazione 6×6 , e λ_{max} è il massimo autovalore della matrice di comparazione in esame. Nelle applicazioni pratiche si è dimostrato che un valore di $CR \leq 0.1$ rappresenta un giudizio consistente [9].

Il passaggio successivo consiste nell'aggregare gli elementi di A definendo le componenti del vettore dei pesi w da assegnare ai criteri. Per fare ciò si è utilizzato il metodo dell'autovettore principale che consiste nell'identificare il vettore w come l'autovettore principale (quello relativo all'autovalore più alto) di A . Quindi, data una matrice di comparazione A , il vettore w risulta da:

$$\begin{cases} Aw = \lambda_{max} w \\ w^T e = 1 \end{cases} \quad (3)$$

dove e è il vettore di dimensione K definito come $e = (1, \dots, 1)^T$. Il risultato è presentato di seguito:

$$w = \begin{pmatrix} 0.41 \\ 0.45 \\ 0.38 \\ 1.00 \\ 0.23 \\ 0.50 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} 0.14 \\ 0.15 \\ 0.13 \\ 0.34 \\ 0.08 \\ 0.17 \end{pmatrix} \quad (4)$$

in cui, nuovamente, le righe si riferiscono in maniera ordinata ai criteri: *ACTIVITY*, *APPARATUS*, *BARRIER*, *EVENT*, *PEOPLE*, *SUBSTANCE*. Si noti come il vettore w sia stato normalizzato.

La metrica di completezza η è stata infine definita attraverso la somma dei pesi delle etichette presenti in un report di quasi-incidente, prese una singola volta. In questo modo la completezza del report varia tra 0 e 1, con valore massimo quando tutte le informazioni sono state inserite almeno una volta nel documento. Una volta calcolati i pesi per ogni elemento contenuto nel report, la metrica di completezza è stata integrata nel knowledge graph. Per fare ciò, un'ulteriore proprietà $p_{4,n}^N$ denominata *completeness* (i.e., completezza) è stata aggiunta ai nodi con etichetta *DOCUMENT*.

3. Risultati dell'analisi

Nella sezione seguente i passi metodologici della sezione 2 sono applicati a un dataset di circa 4.000 segnalazioni di quasi-incidenti, raccolte in più di 250 stabilimenti industriali italiani operanti in 26 dei 39 settori identificati dalla direttiva Seveso (Allegato V sezione A2). Il knowledge graph risultante conta più di 45.000 nodi e 75.000 relazioni. La dimensione del grafo motiva, come già sottolineato in Sezione 1, la necessità di un processo sistematico per permettere la meta-analisi di sicurezza proposta.

Il knowledge graph, così come costruito, consente di analizzare le variazioni della metrica di completezza in relazione a diverse dimensioni. Ad esempio, la completezza dei report può essere analizzata attraverso: (i) settore industriale di provenienza (cioè navigando le connessioni con i nodi con etichetta *INDUSTRIAL_SECTOR*), (ii) stabilimento di provenienza (cioè navigando connessioni con i nodi con etichetta *ESTABLISHMENT*), (iii) data di raccolta (cioè estraendo la proprietà *collection_date* dai nodi con etichetta *DOCUMENT*), (iv) data di redazione (cioè estraendo la proprietà *occurrence_date* dai nodi con etichetta *DOCUMENT*), (v) ubicazione (cioè estraendo le proprietà *location_region* e *location_district* dai nodi con etichetta *ESTABLISHMENT*), o combinazioni di queste. Nel successivo paragrafo sarà presentata, a titolo di esempio, uno scenario di meta-analisi, i.e., completezza dei report in relazione ai settori industriali e stabilimenti.

3.1. Andamento della completezza per stabilimenti e settori industriali

Per permettere una presentazione dei risultati più chiara e sintetica, sono state evidenziate alcune affinità tra i settori industriali legati alla direttiva Seveso, tenendo

conto dei motivi per cui essi devono rispettare la direttiva. Di conseguenza, l'analisi considera solo sei macrosettori così definiti:

- MS1: contenente quei settori i cui principali rischi associati alle loro attività industriali non sono direttamente collegati alla direttiva Seveso. La loro attività principale non è legata alla direttiva.
- MS2: contenente tutti quei settori le cui attività coinvolgono il petrolio e gli idrocarburi.
- MS3: contenente tutti quei settori le cui attività sono legate all'utilizzo di esplosivi.
- MS4: contenente tutti quei settori industriali che lavorano con i gas
- MS5: contenente tutti quei settori industriali che lavorano con sostanze chimiche o prodotti correlati.
- MS6: contenente tutti quei settori le cui attività sono legate alla gestione dei rifiuti.

Questa stratificazione è presentata per rispecchiare l'ipotesi che i macrosettori siano considerati omogenei in termini di peculiarità di rendicontazione dei report di quasi-incidente. Si noti che i dati relativi allo stabilimento di provenienza sono stati resi anonimi per garantire la privacy delle aziende.

Questa prima analisi valuta quindi la completezza nella redazione dei report di quasi-incidente degli stabilimenti Seveso all'interno del dataset, considerando anche il loro macro-

settore di appartenenza. Per fare ciò, viene dapprima eseguita un'analisi esplorativa del grafo per ricavare i dati di interesse. L'analisi esplorativa è schematizzata in Figura 1, essa consiste in tre fasi principali:

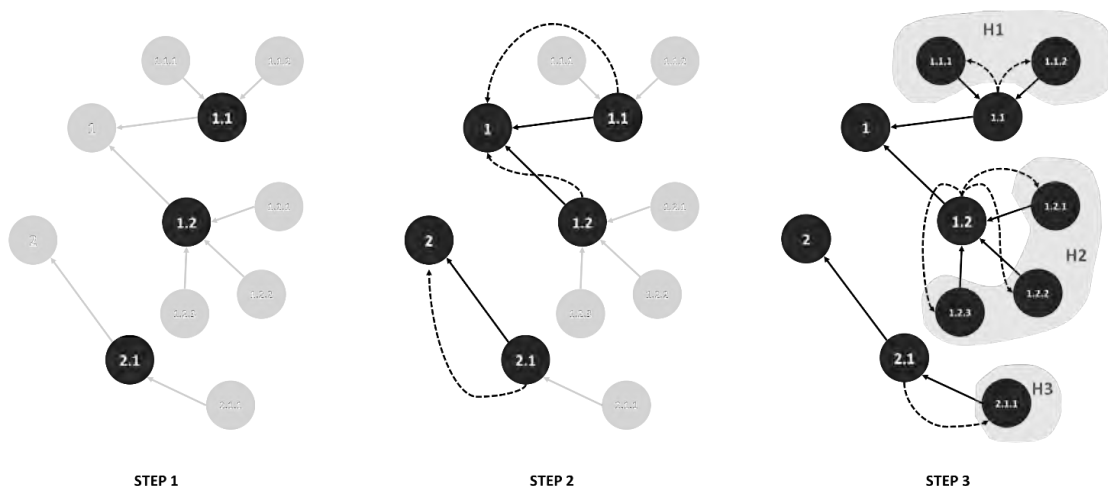


Figura 1. Schematizzazione dell'analisi esplorativa del grafo per ricavare i dati di interesse.

- Step 1: si identificano nel grafo tutti i nodi con etichetta *ESTABLISHMENT* i quali rappresentano la chiave unica ed il fulcro dell'analisi. In Figura 1 essi sono i nodi denominati con due cifre.
- Step 2: di tutti i nodi identificati, si navigano le relazioni con etichetta *BELONGS_TO* raggiungendo i relativi nodi con etichetta *INDUSTIAL_SECTOR* (i nodi denominati

con una sola cifra in Figura 1). Questa fase permette di estendere l'analisi considerando anche i macro-settori a cui gli stabilimenti afferiscono.

- Step 3: ripartendo dai nodi identificati in Step 1, si navigano le relazioni con etichetta *FROM* in modo tale da ricavare, per ogni stabilimento industriale, i relativi documenti di quasi-incidente. Questo step permette di assegnare ad ogni chiave univoca (nodi con etichetta *ESTABLISHMENT*) un insieme di documenti (nodi con etichetta *DOCUMENT*), conservando anche il macro-settore industriale di afferenza (nodo con etichetta *INDUSTRIAL_SECTOR*).

Gli insiemi di nodi con etichetta *DOCUMENT* così definiti (ad esempio, H1, H2, H3 in Figura 1) sono utilizzati per il calcolo della completezza. Una semplice media aritmetica è utilizzata per definire l'abilità delle aziende di completare opportunamente i report di quasi-incidente.

I risultati sono presentati in Figura 2, i relativi colori identificano il macro-settore di appartenenza. Il grafico mostra la frequenza normalizzata del numero di stabilimenti che garantiscono un determinato valore di completezza, raggruppandoli per macrosettori. La completezza media può ulteriormente essere valutata in relazione al numero di report sottomessi (in Tabella 1 sono presentati dei dati numerici relativi alla numerosità di stabilimenti e report in ogni macro-settore).

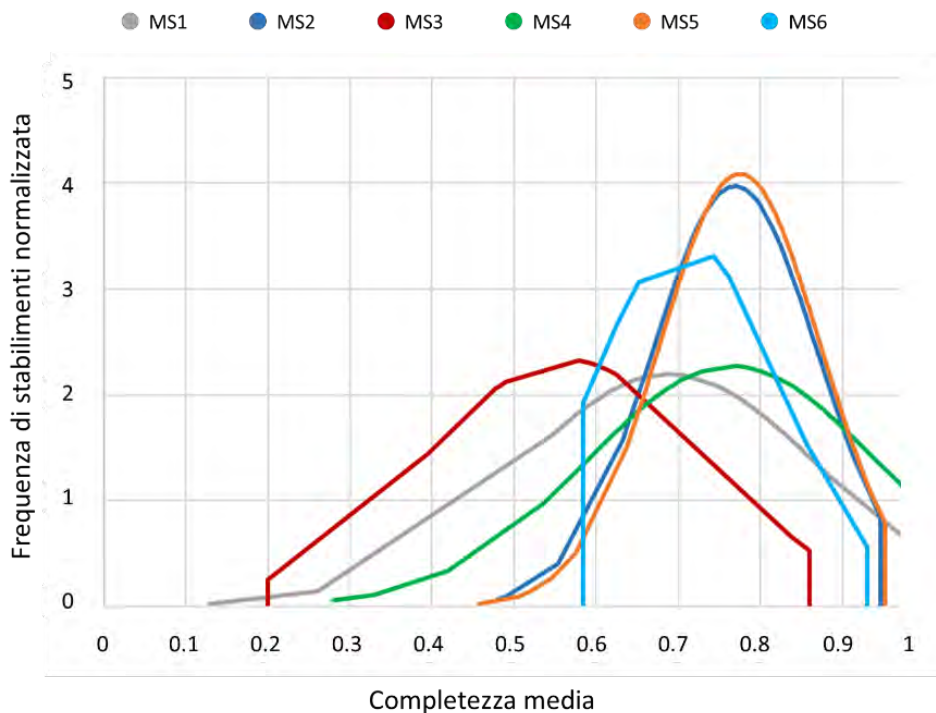


Figura 2. Analisi degli stabilimenti industriali per macro-settore attraverso la completezza media garantita e la frequenza di stabilimenti per macro-settore normalizzata.

| Metrica | MS1 | MS2 | MS3 | MS4 | MS5 | MS6 |
|---|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Numero di stabilimenti | 32 | 49 | 12 | 47 | 111 | 9 |
| Numero di report | 483 | 538 | 94 | 328 | 2286 | 94 |
| Numero medio di report per stabilimento | 15.09 | 10.98 | 7.83 | 6.98 | 20.59 | 10.44 |

Tabella 1. Analisi numerica di stabilimenti e report per macro-settore industriale.

È evidente come alcuni macro-settori siano costituiti da stabilimenti che hanno una migliore capacità di garantire una narrazione completa dei quasi-incidenti. In particolare, MS2 (i.e., raffinerie, blu) e MS5 (i.e., chimici, arancio) si dimostrano due macro-settori particolarmente abili in termini di completezza media che i loro stabilimenti riescono a garantire. Il MS5 ha anche il punteggio più alto per quanto riguarda i rapporti presentati. Questo risultato può essere sintomo di una forte sensibilità del MS5 nella gestione dei quasi-incidenti, ma è anche chiaramente legato al maggior numero di stabilimenti appartenenti a questo macro-settore (vedi Tabella 1). D'altra parte, MS4 (i.e., gas, verde) mostra un'ampia distribuzione della completezza media, sottolineando la presenza di differenze interne tra i vari attori dello stesso settore. Questo risultato è anche un indicatore del fatto che alcuni stabilimenti dell'MS4 potrebbero trarre particolare beneficio dalle lezioni apprese da altri attori del settore per migliorare la loro capacità di gestire i quasi incidenti.

4. Conclusioni

Il presente lavoro esamina l'importanza dei quasi-incidenti e mette in evidenza come questi ultimi possano essere utilizzati come indicatore chiave per migliorare la sicurezza industriale negli stabilimenti di Seveso. Su questa base, le informazioni contenute nelle segnalazioni di quasi-incidenti devono essere massimizzate per aiutare le organizzazioni ad identificare e mitigare i rischi prima che giungano ad epiloghi più gravi. Il documento presenta una meta-analisi della sicurezza che aggiorna il knowledge graph in [6] aggiungendo dei pesi ricavati tramite interviste ai nodi del grafo. Questi ultimi permettono di calcolare una metrica di completezza che valuta il contenuto informativo di ogni segnalazione.

La meta-analisi presentata è, in questa fase, puramente descrittiva (cioè, come sono state svolte le analisi). Tuttavia, questi risultati aprono la strada allo sviluppo di uno strumento prescrittivo (cioè, come dovrebbero essere svolte le analisi). Quest'ultimo può aiutare sia i responsabili della sicurezza delle industrie a redigere rapporti altamente informativi, sia gli ispettori delle autorità di regolamentazione a individuare le criticità e a suggerire aree di miglioramento. Partendo da questa base,

i principi del graph embedding possono essere utilizzati per consentire l'uso di algoritmi di apprendimento automatico per eseguire il completamento delle relazioni o la classificazione di nuovi nodi [10].

Considerare i quasi-incidenti come opportunità di miglioramento può far sì che le organizzazioni costruiscano una cultura del miglioramento continuo, della fiducia e della responsabilità che favorisca un ambiente di lavoro più sicuro e resiliente. Pertanto, la meta-analisi proposta in questa ricerca supporta le industrie nell'incoraggiare le segnalazioni sulla sicurezza e fornire una solida base per le riflessioni critiche.

Riconoscimenti

Questo lavoro è parte del progetto di Dottorato di Ricerca XXXVII Ciclo "Cognitive and Physical Modelling of Complex Industrial Processes for Vulnerability Analysis and Resilient Design" (dottorando: Francesco Simone) finanziato da INAIL in collaborazione con il Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Aerospaziale presso "La Sapienza" Università di Roma.

Bibliografia

- [1] P. Agnello, S. M. Ansaldi, and P. A. Bragatto, "Plugging the gap between safety documents and workers perception, to prevent accidents at seveso establishments," *Chem. Eng. Trans.*, vol. 26, pp. 291 – 296, 2012, doi: 10.3303/CET1226049.
- [2] J. R. Phimister, U. Oktem, P. R. Kleindorfer, and H. Kunreuther, "Near-miss incident management in the chemical process industry," *Risk Anal.*, vol. 23, no. 3, pp. 445 – 459, 2003, doi: 10.1111/1539-6924.00326.
- [3] S. M. Ansaldi, A. Pirone, M. R. Vallerotonda, P. Agnello, and P. Bragatto, "Near misses from the seveso inspections: Use of knowledge based methods for safety improvement," *Chem. Eng. Trans.*, vol. 77, pp. 421–426, 2019, doi: 10.3303/CET1977071.
- [4] EU Council, "DIRECTIVE 2012/18/EU On the control of major accident hazards involving dangerous substances," *Off. J. Eur. Union*, vol. L197, pp. 1–37, 2012.
- [5] DLgs 105-2015, "Attuazione della direttiva 2012/18/UE relativa al controllo del pericolo di incidenti rilevanti connessi con sostanze pericolose.," 2015.
- [6] F. Simone, S. M. Ansaldi, P. Agnello, and R. Patriarca, "Industrial safety management in the digital era: Constructing a knowledge graph from near misses," *Comput. Ind.*, vol. 146, p. 103849, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compind.2022.103849>.
- [7] S. M. Ansaldi, P. Agnello, A. Pirone, and M. R. Vallerotonda, "Near miss archive: A challenge to share knowledge among inspectors and improve seveso inspections," *Sustain.*, vol. 13, no. 15, 2021, doi: 10.3390/su13158456.

- [8] T. L. Saaty, "How to make a decision: The analytic hierarchy process," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 48, no. 1, pp. 9 – 26, 1990, doi: 10.1016/0377-2217(90)90057-I.
- [9] M. Brunelli, *Introduction to the Analytic Hierarchy Process*. Springer Cham, 2015. doi: 10.1007/978-3-319-12502-2.
- [10] Q. Wang, Z. Mao, B. Wang, and L. Guo, "Knowledge graph embedding: A survey of approaches and applications," *IEEE Trans. Knowl. Data Eng.*, vol. 29, no. 12, pp. 2724–2743, 2017, doi: 10.1109/TKDE.2017.2754499.

Il ruolo dell'errore umano in incidenti e quasi-incidenti nei siti di stoccaggio di GPL: indagine ad ampio raggio tramite analisi di database incidentali

S. Carra¹, P. Agnello¹, L. Monica¹, C. Di Girolamo²

¹ Inail - Dit

² Inail - Uot di Piacenza

Abstract

I depositi di GPL rappresentano una percentuale significativa degli impianti a rischio di incidente rilevante italiani. La necessità di garantire efficaci condizioni di sicurezza, come da Direttiva Seveso, porta le aziende coinvolte a registrare regolarmente gli incidenti ed i quasi-incidenti (near-miss), riportati anche nel corso delle ispezioni periodiche effettuate dagli organi di vigilanza.

Il presente lavoro si propone di indagare, anche quantitativamente, quale sia l'effettivo ruolo dell'errore umano nel verificarsi di incidenti e quasi incidenti nei depositi di GPL, a partire dall'analisi di un'ampia serie di eventi estratta dal database Inail "EsOpIA" (Esperienze Operative e Intelligenza Artificiale). Lo studio analizza in particolar modo le possibili cause incidentali e le soluzioni adottate, anche tenendo conto di quanto, negli anni, il contributo dell'errore umano possa essere stato controbilanciato da più efficienti modalità di manutenzione e nuovi accorgimenti tecnologici. Ciò anche al fine di individuare trend di settore e stimolare alla diffusione di buone pratiche e strumenti aggiuntivi di valutazione dei modelli di gestione della sicurezza in tali impianti.

Keywords: depositi di GPL; errore umano; manutenzione; incidenti; near-miss.

1. Introduzione

Dagli anni 2000 in avanti, lo sviluppo di nuove soluzioni tecnologiche per il travaso e lo stoccaggio di GPL, unitamente alla definizione di normative di settore sempre più stringenti, ha modificato il peso che ciascuna delle potenziali cause incidentali (errore umano, fattori organizzativi, carenze tecnologiche) poteva avere sulle effettive condizioni di sicurezza dei siti industriali dedicati a tali attività. Essi sono soggetti alla Direttiva 2012/18/UE (Seveso III), recepita in Italia dal d.lgs. 105 del 26 giugno 2015, poiché presentano quantità di sostanze pericolose che permettono di classificare gli stessi come stabilimenti di Soglia Inferiore e Soglia Superiore secondo l'art. 3 del medesimo Decreto. Tali quantitativi sono infatti tali da poter potenzialmente produrre conseguenze devastanti qualora si verifici un incidente, per esempio in caso di rilascio o sversamento di prodotto e successivo innesco efficace.

Ai fini della sicurezza, essendo fortunatamente rari gli incidenti a sviluppo incontrollato con effetti catastrofici su cose e persone all'interno e/o all'esterno degli stabilimenti, è a maggior ragione necessario registrare sia gli eventi incidentali che quelli quasi-incidentali (i cosiddetti "near-miss"), nonché circostanze o comportamenti umani impreveduti, ai fini di poter successivamente rianalizzare nel complesso accadimenti che, essendo più frequenti, hanno anche un maggior peso dal punto di vista statistico. Peraltro, nella lista di riscontro utilizzata in sede di verifica ispettiva (lista 3.) alla voce 7- controllo delle prestazioni, ii) viene richiesto che il gestore abbia predisposto una procedura per la classificazione di incidenti, quasi incidenti, anomalie, ecc. e che ne preveda le registrazioni e l'analisi al fine di individuare interventi gestionali idonei attraverso l'adozione di misure preventive e correttive.

Si definiscono "near-miss" quegli eventi indesiderati che non hanno comportato danni o infortuni significativi ma che avrebbero potuto generare conseguenze ben peggiori (in termini di lesioni sulle persone, danni alla proprietà o errori di processo) laddove si fossero verificati in circostanze meno fortunate (come in caso di mancata accensione di sostanze infiammabili rilasciate) o fossero stati innescati da condizioni particolarmente avverse. In particolare, la norma UNI 10617:2019 (Stabilimenti con pericolo di incidente rilevante – Sistemi di gestione della sicurezza – Requisiti essenziali) definisce il "quasi incidente rilevante" come un qualunque evento straordinario che avrebbe potuto trasformarsi in un incidente rilevante, specificando inoltre che la differenza tra incidente rilevante e quasi incidente non risiede nelle cause o nelle modalità di evoluzione dell'evento, ma solo nel diverso grado di sviluppo delle conseguenze o nella casualità della presenza di cose o persone.

I near-miss possono essere considerati possibili precursori di eventi catastrofici durante tutta la vita operativa dell'impianto [1], dunque la loro analisi può rappresentare il punto di partenza per riuscire ad anticipare e prevenire grandi disastri nei contesti industriali. Per questo motivo, la letteratura scientifica già da tempo propone metodologie di raccolta ed analisi storica di tali eventi incidentali e quasi-incidentali, evidenziandone tra l'altro criteri di classificazione e dando un peso particolare al ruolo assunto dai comportamenti umani non sicuri nonché dai presupposti per il verificarsi di tali atti (condizioni di lavoro, supervisione non idonee e influenze organizzative) [2].

Alla luce di tali evidenze tecnico-scientifiche, l'archivio INAIL "EsOplA" è nato con la peculiarità di riuscire ad indicizzare, mediante algoritmi di machine learning, le esperienze operative degli impianti a rischio di incidente rilevante, raccolte durante le ispezioni di cui all'art. 27 del d.lgs. 105/15 dagli ispettori INAIL, includendo in tale attività di catalogazione anche e soprattutto i quasi-incidenti [3]. Il modello costruito in EsOplA consente all'utente di tale strumento (che sia un ricercatore, un ispettore o un tecnico) di estrarre informazioni in modo più mirato rispetto ad un database classico, in quanto per ogni evento l'algoritmo di machine learning è in grado di individuare concetti e di rappresentare l'evento stesso sotto forma di grafi entità-relazioni [4]. Si specifica comunque che lo strumento non estrae dalle schede delle

esperienze operative i cosiddetti “fattori gestionali”, indicati tramite la numerazione del pertinente punto di riscontro così come riportato nella lista di controllo.

Un precedente lavoro di alcuni degli autori del presente studio aveva analizzato gli eventi quasi-incidentali occorsi in un singolo sito italiano di stoccaggio di GPL nel corso di un decennio, notando come le esperienze operative delle ispezioni Seveso non avessero evidenziato un particolare ruolo avuto dall'errore umano nell'insorgere dei near-miss [5]. Allo stesso tempo, emergeva un piano manutentivo particolarmente attento e prudente, capace di risolvere buona parte delle problematiche emerse.

Ciò in contrasto con precedenti ricerche riportate dalla letteratura nazionale ed internazionale, che avevano dimostrato che i rischi nelle operazioni di travaso di GPL possono essere fortemente influenzati dal fattore umano, per esempio nelle fasi di travaso del prodotto (da autobotte a serbatoio e viceversa) o comunque durante fasi di verifica e controllo [6].

Il presente lavoro nasce quindi con l'obiettivo di estendere l'analisi precedentemente svolta [5] ad un maggior numero di siti GPL, in modo da confermare o smentire tale ridotto contributo del fattore umano all'insorgenza di incidenti ed evidenziare, eventualmente, buone pratiche e/o procedure manutentive che negli anni possano averne modificato il peso.

A tal fine, lo strumento EsOplA è stato scelto non solo per la numerosità degli eventi in esso contenuti, ma perché esso è apparso in grado – attraverso gli algoritmi di machine learning - di orientare meglio e velocizzare la ricerca dei quasi-incidenti di interesse.

2. Raccolta dati ed analisi

Il database EsOplA è strutturato in modo da consentire all'utente di effettuare una ricerca di singole parole, gruppi di parole o frasi che l'algoritmo di machine learning rielabora in termini di linguaggio naturale, “ragionando” secondo il livello di addestramento ricevuto fino a quel momento e fornendo quindi all'utente una lista di schede operative contenenti gli eventi di potenziale interesse.

Al fine di raffinare ulteriormente la ricerca, è possibile anche applicare dei filtri, alcuni dei quali permettono di isolare le schede in cui l'algoritmo ha individuato concetti o relazioni specifici. Per esempio, cercare l'“EVENTO” “Rilascio” consente di selezionare solo quegli eventi caratterizzati da una perdita di contenimento, fuoriuscita o spandimento di prodotto, mentre “Guasto” riguarda i malfunzionamenti, le rotture o la mancanza di determinate attività/attrezzature.

Nel caso specifico, si è scelto di iniziare la ricerca semplicemente ricercando la parola “GPL” (l'algoritmo è case-insensitive), avendo consapevolezza però di poter trovare così eventi riguardanti non solo siti di stoccaggio GPL, ma anche altri contesti dove il GPL potesse avere un ruolo secondario. In questo modo, si sono individuati 136 eventi su un totale di 3399 in quel momento contenuti in EsOplA. Il database è infatti in continuo aggiornamento e via via vengono introdotti nuovi dati provenienti da altre ispezioni SEVESO.

Successivamente, si è scelto di filtrare i risultati in base all'attività svolta nei siti industriali in cui si sono verificati gli eventi e considerando quindi le due denominazioni che ufficialmente definiscono i siti di nostro interesse: "STOCCAGGIO DI GPL" e "PRODUZIONE, IMBOTTIGLIAMENTO E DISTRIBUZIONE ALL'INGROSSO DI GAS DI PETROLIO LIQUEFATTO (GPL)". In tal modo, la lista degli eventi si è ridotta a 109 elementi. Infine, si è scelto di considerare solo le schede in cui effettivamente la "SOSTANZA" principale fosse "GPL": la lista delle schede si è così ridotta a 100 elementi. Tra di essi, si è deciso poi di escludere 4 eventi, quelli cioè che (i) non si sono svolti all'interno di siti industriali (bensì in distributori stradali di GPL, autobotti in itinere, etc.) o (ii) non sono apparsi descritti con sufficiente dettaglio nelle schede operative. Successivamente, al fine di verificare che l'algoritmo avesse fatto una selezione completa e soprattutto che non fossero state escluse schede contenenti importanti riferimenti al ruolo dell'errore umano nell'insorgere dei quasi-incidenti, è stata svolta una seconda ricerca. A partire dai suddetti 136 eventi, il risultato è stato filtrato questa volta attraverso il parametro "Persone", selezionando la voce "Tutti", in modo da individuare gli eventi che coinvolgessero qualsiasi tipo di persona (operatori, responsabili per la sicurezza etc.): tali eventi sono risultati essere una cinquantina. Tra di essi, sono stati poi individuati quelli in cui il comportamento di tali individui era stato ritenuto tra le cause dell'evento (escludendo invece casi in cui le persone avevano solo assistito ai fatti o li avevano segnalati), individuando così un insieme di circa 20 schede. Da un confronto con il risultato della precedente ricerca, è emerso che tali schede erano già presenti anche nella suddetta lista di 96 eventi, che dunque è stata ritenuta idonea ad essere sottoposta alla successiva fase di analisi. Gli eventi selezionati sono stati quindi inseriti in un foglio di calcolo, così da essere catalogati e classificati in base agli attributi specifici dettagliati in Tabella 1. Questi ultimi sono stati prevalentemente scelti in base ad analoghi criteri utilizzati nel precedente lavoro svolto [5], così da permettere un confronto più omogeneo dei risultati.

| Attributo | Descrizione |
|----------------------------------|--|
| Anno | Anno in cui si è verificato l'evento |
| Gravità dell'evento | Livello di gravità a seconda delle conseguenze dell'evento: 1 = nessun infortunio, nessun danno, nessun rilascio di sostanze pericolose; 2 = nessun ferito, nessun danno, piccoli rilasci di sostanze pericolose; 3 = nessuna lesione, danno a proprietà o attrezzature, nessuna perdita di contenimento; 4 = rilascio di sostanze pericolose, ma senza infortuni; 5 = infortuni lievi, con rilascio di sostanze pericolose; 6 = evento con ulteriori conseguenze sull'ambiente circostante. |
| Tipologia di evento indesiderato | Rilascio in fase di carico GPL; Rilascio in fase di scarico GPL; Rilascio da compressore; Rilascio da pompa; |

| | |
|--|---|
| | Anomalia inerente riempimento e gestione delle bombole; Anomalia (diversa da rilascio) su compressori o pompe; Anomalia su allarmi, sensori ed elettronica di controllo; Altre anomalie |
| Principale presunta causa innescante l'evento | Disattenzioni dell'operatore; Errate valutazioni da parte dell'operatore; Errate impostazioni di sistema/impianto; Usura, mancanze nella manutenzione, pezzi difettosi; Errori di installazione; Carenze tecniche/progettuali; N/A. |
| Presenza di una componente di causa data dall'errore umano | Comportamenti dei lavoratori possono essere considerati la causa (o una delle cause) dell'evento indesiderato: SI'/NO |
| Presenza di una componente di causa tecnologica | Caratteristiche dell'impianto/apparecchiatura possono essere considerate la causa (o una delle cause) dell'evento indesiderato: SI'/NO |
| Presenza di una componente di causa organizzativa | Eventuali procedure e norme organizzative possono essere considerate causa (o una delle cause) dell'evento indesiderato: SI'/NO |
| Azioni intraprese e programmate | Interventi basati sull'organizzazione del lavoro (es. formazione dei lavoratori, procedure di controllo e manutentive) e sul miglioramento dei sistemi tecnici (riprogettazione, ottimizzazione dei componenti). |

Tabella 1. Attributi per la classificazione degli eventi indesiderati.

La maggior parte degli eventi identificati rientra nelle categorie di "gravità" 1-2, ossia quelle a minor impatto, che a tutti gli effetti sono classificabili come near-miss, ma che comunque non vanno trascurate in quanto anche piccoli rilasci di GPL possono essere precursori di gravi incidenti.

Non mancano comunque, anche in anni recenti, livelli di gravità appena più alti, in particolare casi di rilascio di sostanza in quantità non trascurabile (livello 4), a testimonianza del fatto che è a tutt'oggi importante mantenere un alto livello di attenzione. Buona parte degli eventi qui individuati, estratti da EsOplA, si concentra nel periodo 2013-2018; peraltro, in una dozzina di schede non era riportata la data.

La Figura 1 mostra la percentuale di eventi indesiderati identificati per ciascuna tipologia di possibile anomalia, incluse quelle relative alle classiche perdite in fase di travaso (18%) e quelle relative alle macchine coinvolte (pompe e compressori) (11%). Si è inoltre scelto di evidenziare particolarmente tutti i quasi-incidenti relativi a problematiche nell'elettronica e sensoristica digitale di controllo (19%), così come tutte le anomalie specificatamente legate alla gestione delle bombole di GPL (23%).

Resta poi una significativa "fetta" di eventi indicata come "Altre anomalie" (29%): essa individua altre categorie rispetto a quelle riportate nel precedente studio [5], di cui, in particolare, un 64% costituito da avarie o rotture di componenti meccanici o strumenti

di misura ed un 22% costituito da altre tipologie di rilascio di GPL (per esempio, da valvole non coinvolte nella procedura di carico/scarico).

In merito invece all'individuazione delle possibili cause dei quasi-incidenti, la Figura 2 mette in evidenza un 23% di casi prevalentemente dovuti ad errore umano, qui inteso come l'errore degli operatori, nelle sue varie manifestazioni (errore di distrazione, di valutazione, etc.). Nel 10% dei casi risultano significative carenze tecniche o progettuali, sulle quali tipicamente si è intervenuto tramite successive programmazioni di acquisti di nuovi componenti o modifiche impiantistiche.

È ben evidente, infine, un 63% di eventi dipendenti da mancanze nella manutenzione, componenti di impianto difettosi ed usura di componenti. Si tratta di una quantità molto significativa, che comprende prevalentemente due tipi di situazioni: (i) un 82% di casi in cui difetti o invecchiamento dei componenti sono stati considerati "nella norma" o imprevedibili e quindi semplicemente gestiti tramite opportune scorte di pezzi di ricambio o interventi di manutenzione estemporanei; (ii) un rimanente 18% dei casi in cui sono emerse vere e proprie carenze manutentive, tali da richiedere interventi di natura organizzativa anche a medio e lungo termine. Anche in quest'ultimo caso, quindi, emerge il ruolo del fattore umano, seppur a livello più alto nella scala gerarchica aziendale, in quanto coinvolgente le figure aziendali che si occupano della gestione delle procedure e della programmazione della manutenzione.

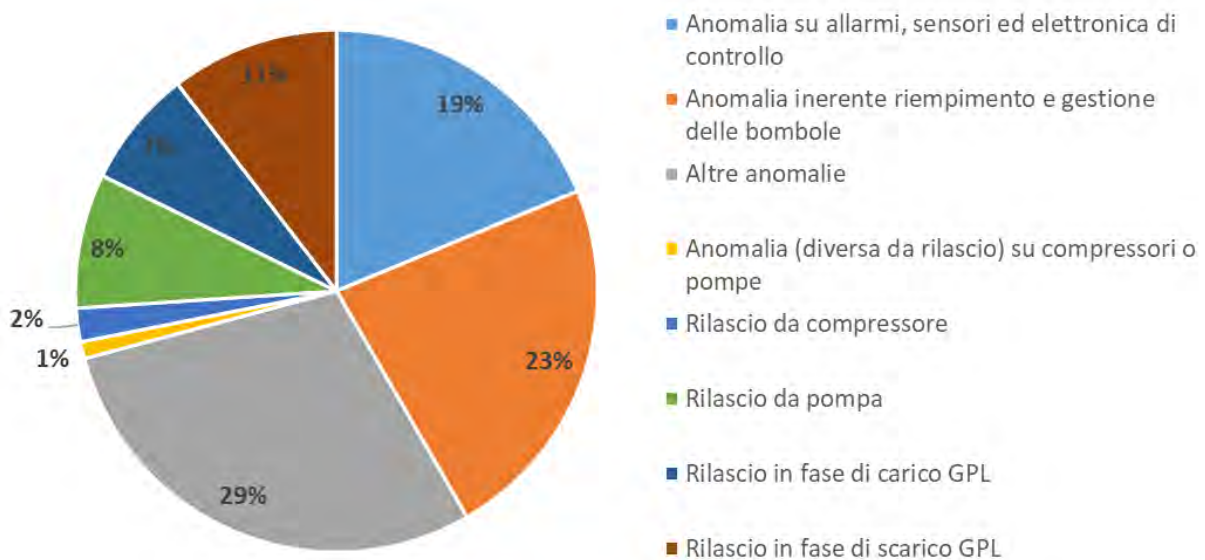


Figura 1. Percentuale di eventi indesiderati identificati per ciascuna tipologia di possibile anomalia.

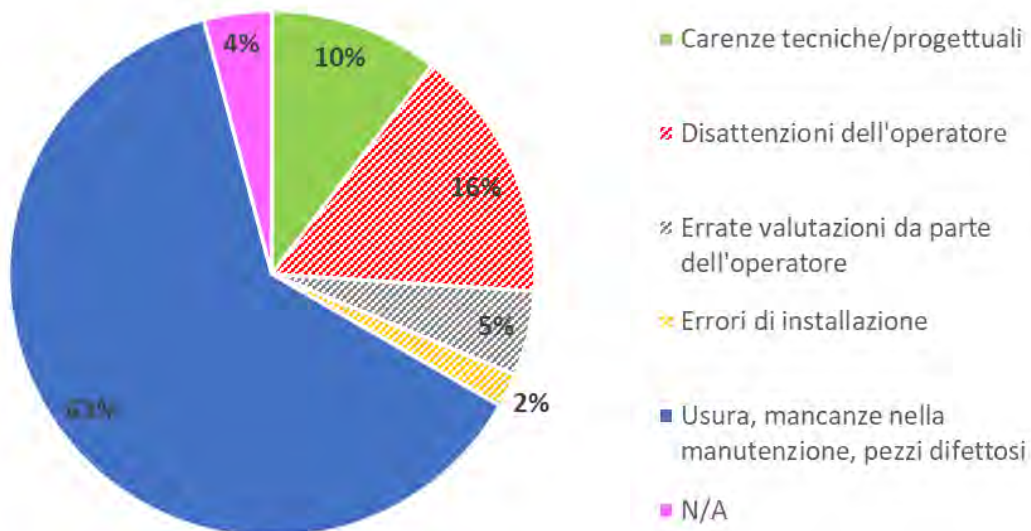


Figura 2. Percentuale di eventi indesiderati identificati per ciascuna principale causa innescante. L'area tratteggiata si riferisce globalmente agli eventi presumibilmente causati da errore umano (operatori front-line).

Le componenti umane e le componenti organizzative che contribuiscono a ciascun evento indesiderato possono infatti essere pensate come connesse. Fattori individuali (ad esempio errori decisionali, errori basati sulle competenze, errori percettivi), fattori di supervisione e fattori organizzativi (ad esempio clima organizzativo, gestione delle risorse) sono correlati e gestibili soprattutto tramite interventi di natura organizzativa. In particolare, sono state anche analizzate le tipologie di intervento attuate in seguito a ciascun evento indesiderato (sia come azioni intraprese che come azioni programmate), soprattutto in relazione alle attività di correzione e prevenzione di possibili errori degli operatori front-line. In alcuni casi, sono state organizzate nell'immediato riunioni con gli addetti al fine di approfondire quanto accaduto. Nel 25% dei casi, inoltre, sono state programmate attività di formazione, informazione ed addestramento sulle tematiche di sicurezza connesse agli eventi indesiderati occorsi, oltre che azioni di sensibilizzazione dei lavoratori, per esempio in merito alla regolare attuazione di controlli giornalieri per la rilevazione di piccole perdite sull'impianto, difficilmente rilevabili dai sistemi di protezione.

3. Interpretazione dei risultati e conclusioni

Il presente studio ha analizzato una serie di quasi-incidenti occorsi dal 2006 al 2021 in una pluralità di siti italiani di stoccaggio, produzione ed imbottigliamento di GPL, al fine di identificare possibili fattori (tecnici, organizzativi e soprattutto umani) che potessero aver contribuito a causare il loro verificarsi.

I dati sono stati estratti dall'archivio INAIL EsOpIA, comprendente, al momento della presente analisi, oltre 3300 schede relative ad eventi quasi-incidentali tratti dalle esperienze operative degli impianti a rischio di incidente rilevante raccolte durante le ispezioni.

Sono state individuate le tipologie di incidenti più comuni nei siti di interesse, unitamente alle presumibili cause di tali eventi, anche alla luce delle misure organizzative e tecnologiche successivamente adottate per risolvere e prevenire tali criticità.

Si è scelto di adottare criteri di analisi simili a quelli utilizzati nell'ambito di un precedente lavoro degli stessi autori, che, nella storia incidentale di un singolo sito di stoccaggio GPL, aveva individuato un contributo quasi nullo dell'errore umano nell'insorgere dei near-miss e, parimenti, una gestione particolarmente attenta e talora quasi ridondante delle procedure manutentive.

I nuovi dati, relativi stavolta ad una pluralità di siti diversi, seppur della stessa tipologia, mostrano una significativa riduzione del peso percentuale degli eventi indesiderati riguardanti le attrezzature e gli impianti di travaso (pompe e compressori), che passano dal 54% evidenziato nel precedente studio all'11%, pur rimanendo sempre significativi. Calano anche, seppur in maniera molto minore, i casi di rilascio in fase di travaso (dal 27% al 18%), mentre crescono di molto i casi individuati riguardanti le problematiche sulle bombole di GPL (dal 7% al 23%).

Rispetto al precedente studio, inoltre, emergono come nuove casistiche importanti sia la problematica delle anomalie nell'elettronica e sensoristica digitale di controllo, sia quella delle avarie/rotture di componenti meccanici o strumenti di misura (non necessariamente associata a rilasci di GPL).

In tutti questi casi, a differenza di quanto osservato in passato dagli autori [5], si evince un ruolo importante del fattore umano come possibile causa degli eventi indesiderati. Esso si attesta infatti ad un 23% dei casi (coinvolgenti errori degli operatori), a cui vanno aggiunti i casi in cui siano state evidenziate importanti carenze a livello gestionale (procedure operative), pari all'11% circa dei casi. Ne è prova il fatto che nel 25% dei casi sono stati successivamente programmati interventi di formazione, informazione ed addestramento degli operatori, oltre che di generale sensibilizzazione all'importanza dei controlli giornalieri dello stato e dell'efficienza delle attrezzature ai fini della sicurezza.

Si può quindi concludere che l'analisi estesa ad un maggior numero di siti di stoccaggio GPL ha riportato alla luce un significativo ruolo dell'errore umano nell'insorgere di near-miss in tale tipologia di impianti. Essi, dunque, nonostante l'alta standardizzazione delle attività ed i rigidi vincoli normativi, non ne sono esenti.

Allo stesso tempo, però, si può presumere che l'ottimizzazione delle procedure manutentive consenta di ottenere, quantomeno, una significativa riduzione della componente umana connessa alla gestione e definizione delle procedure, come appena descritta. È quindi auspicabile la diffusione di buone pratiche manutentive, ad oggi anche potenziabili attraverso l'uso di moderni software dedicati, sulla scia dell'esempio fornito dai siti industriali più "virtuosi" in tal senso.

4. Ringraziamenti

Gli autori sono grati alla Dott.ssa Silvia Maria Ansaldi per il supporto fornito in merito all'utilizzo del database EsOpIA.

5. Bibliografia

- [1] Paté-Cornell E. On "black swans" and "perfect storms": risk analysis and management when statistics are not enough. *Risk Anal.* 2012; 32(11): 1823-1833.
- [2] Baldissonne G., Demichela M., Comberti L., Murè S. Occupational accident-precursors data collection and analysis according to Human Factors Analysis and Classification System (HFACS) taxonomy. *Data Br.* 2019; 26: article number 104479.
- [3] Ansaldi S.M., Pirone A., Vallerotonda M.R., Agnello P., Bragatto P. Near misses from the Seveso inspections: use of knowledge-based methods for safety improvement. *Chem. Eng. Trans.* 2019; 77: 421–426.
- [4] Ansaldi S.M., Agnello P., Pirone A., Vallerotonda M.R. Near miss archive: a challenge to share knowledge among inspectors and improve Seveso inspections. *Sustain. (Switz.)* 2021; 13(15): article number 8456.
- [5] Di Girolamo C., Carra S., Monica L., Tonti A. Risks in loading and unloading LPG at storage sites: analysis of a set of quasi-accidental events. *Chem. Eng. Trans.* 2023; 99: 343–348.
- [6] Silvestri F., Saccone M.V., Incorvaia C.F. The risk of release during transfer from mobile tanks: factors related to transport systems, characteristics of the transfer points and human component. Proposals for plant and regulatory interventions. Atti della Conferenza VGR2000 (*Risk assessment and management in civil and industrial settlements*). Pisa, 24-26 Ottobre 2000.

Esplosione CVE ed incendio di vapori infiammabili durante svuotamento di serbatoio atmosferico – criticità delle operazioni di cambio/travaso di liquidi altamente infiammabili da serbatoio a serbatoio

F. Delli Quadri

ISPRA – Servizio per i Rischi e la Sostenibilità Ambientale delle Tecnologie, delle Sostanze Chimiche, dei Cicli Produttivi e dei Servizi Idrici e per le Attività Ispettive, VAL-RTEC

Abstract

L'analisi dell'esperienza storica degli incidenti industriali costituisce una fonte basilare da cui estrapolare importanti lezioni tecniche e gestionali da apprendere, sia per i gestori delle industrie a rischio di incidente rilevante, sia per le pubbliche Amministrazioni impegnate nelle attività di controllo. Tale analisi costituisce da sempre un'attività fondamentale nelle funzioni di prevenzione e controllo del rischio industriale svolte dal Settore VAL-RTEC-IND di ISPRA, sia per monitorare una visione panoramica della situazione incidentale a livello nazionale, sia per focalizzare l'attenzione su determinati aspetti relativi alle diverse tipologie di rischio presenti nelle realtà industriali Seveso, dove la presenza di sostanze pericolose risulta determinante come fattore aggravante nella possibilità di accadimento/evoluzione di incidente. A tal proposito il lavoro focalizza l'attenzione sullo specifico aspetto dei rischi connessi con l'operazione di cambio/travaso di prodotti pericolosi da un serbatoio all'altro, operazione diffusa in quasi tutte le suddette attività, ma prevalente nelle realtà di stoccaggio e movimentazione di prodotti chimici.

Keywords: travaso, drenaggio, serbatoi, stabilimenti Seveso, stoccaggi liquidi infiammabili.

1. Caso studio

1.1 Descrizione stabilimento – attività

Il caso studio analizzato riguarda un evento occorso negli ultimi anni presso un deposito costiero di prodotti chimici soggetto al D.Lgs. 105/15 (stabilimento di soglia superiore), relativo ad esplosione CVE ed incendio di vapori di acetato di etile verificatosi durante l'operazione di svuotamento di serbatoio atmosferico.

Nel deposito costiero sono effettuate operazioni di stoccaggio e movimentazione di prodotti chimici, petrolchimici, biodiesel e oli minerali, con caratteristiche di pericolosità legate alla loro natura tossica, ecotossica e/o infiammabile. Per il

ricevimento delle sostanze via mare, con arrivo della nave cisterna sotto la sorveglianza della Capitaneria di Porto, la società usufruisce di 2 accosti del Canale Industriale del Porto, e allo scopo di poter utilizzare anche una terza banchina sono presenti tubazioni per il collegamento tra la nave ormeggiata ed il sistema di distribuzione ai serbatoi dello stabilimento. Il deposito è costituito da un parco serbatoi di nr. 100 unità (fig. 1-2), progettati e realizzati per stoccare liquidi di diverse categorie (A, B, C) ai sensi del D.M. 31/07/1934. I serbatoi destinati allo stoccaggio di prodotti di categoria A e B sono:

- a tetto fisso ed inertizzati con azoto, erogato da una centrale criogenica di azoto liquido. Il terminale di scarico è collegato al parco serbatoi con tubazioni in acciaio inox munite di stazione PIG che, lanciato sotto pressione di azoto, le svuota e le prosciuga al termine di ogni operazione di trasferimento;
- ubicati in bacini di contenimento dedicati, di volume equivalente al volume del serbatoio;
- dotati di sistemi di allarme indipendenti di alto livello, con due soglie di intervento.



Figura 1. Planimetria stabilimento

I prodotti chimici e petrolchimici sono generalmente stoccati a temperatura ambiente; modesti incrementi della pressione interna possono essere determinati dall'irraggiamento solare o dalle pompe durante le fasi di riempimento dei serbatoi. Alcuni prodotti vengono stoccati a temperatura superiore a quella ambiente mediante riscaldamento del serbatoio, che avviene con l'utilizzo di un serpentino all'interno del quale circola acqua calda; tale operazione è necessaria per garantire la 'pompabilità' dei prodotti durante la stagione fredda. Alcuni prodotti possono essere stoccati in serbatoi dotati di impianto di refrigerazione. La capacità di stoccaggio del deposito è così ripartita (in riferimento al Rapporto di Sicurezza (RdS) ultimo presentato al CTR):

- Liquidi di categoria A 71.904 m³
- Liquidi di categoria B 8.163 m³

- Liquidi di categoria C 62.721 m³
- Capacità complessiva 142.788 m³

In particolare, i serbatoi di categoria A dedicati allo stoccaggio di liquidi facilmente infiammabili sono destinati ad accogliere sostanze diverse, in genere della stessa categoria, in funzione delle richieste di mercato. L'operazione di cambio prodotto nel serbatoio è preceduta da fasi di svuotamento, drenaggio e bonifica dei serbatoi (in corso al momento dell'incidente) descritte nel RdS dell'azienda sotto la voce 'bonifica serbatoi':

- svuotamento del serbatoio con trasferimento del prodotto in cisterna;
- svuotamento e pulizia delle linee di trasferimento mediante PIG a flusso di azoto;
- scollegamento linee - serbatoio;
- apertura passi d'uomo del mantello e del tetto del serbatoio (mediante utensili antiscintilla);
- controllo manichette per la pulizia del serbatoio;
- drenaggio ed eliminazione del residuo di fondo nel serbatoio mediante pompa mobile con ingresso di una persona nel serbatoio;
- ventilazione del serbatoio a seconda della tipologia del prodotto;
- lavaggio del serbatoio (ditta esterna);
- essiccamento del serbatoio forzato o all'aria.

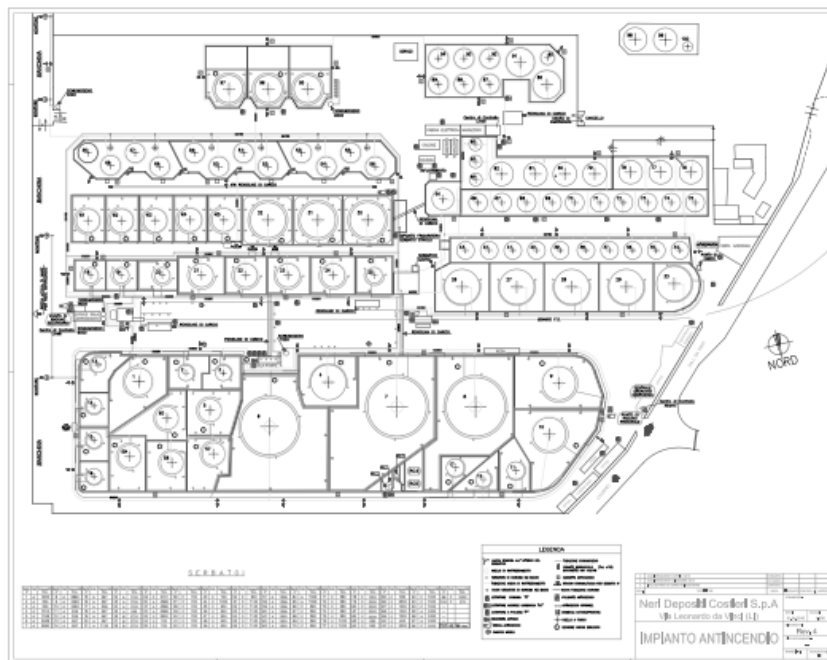


Figura 2. Planimetria di stabilimento tratta dal RdS 2016

Il prodotto sul fondo del serbatoio nella fase di drenaggio è scaricato in autobotte. L'ingresso in serbatoio dell'operatore addetto allo svuotamento avviene secondo le modalità di accesso in spazio confinato previste dal DPR 177/2011. La fase di lavaggio, affidata ad una ditta esterna, può avvenire in atmosfera non infiammabile, ovvero contenente basse quantità di gas infiammabili o in

atmosfera inerte; il gas test avviene dal passo d'uomo del mantello e del tetto del serbatoio, e l'atmosfera all'interno viene periodicamente monitorata (mediante controllo del LEL) per verificare la continuità delle condizioni di sicurezza. Il lavaggio è effettuato con canal-jet utilizzando acqua, che viene continuamente drenata dal serbatoio e raccolta poi in uno scomparto inizialmente vuoto. Una volta terminato il lavaggio, il serbatoio viene lasciato asciugare all'aria se non c'è urgenza di riutilizzarlo, altrimenti si utilizza un aspiratore per l'asciugatura.

1.2 Descrizione apparecchiatura origine dell'evento

Il giorno dell'incidente, in vista di un cambio prodotto programmato nel serbatoio n. 62, origine dell'evento (fig. 3), erano in corso le fasi di svuotamento/drenaggio dello stesso citate al paragrafo precedente. Il serbatoio n. 62, confinante con i serbatoi n° 61 e 63 privi di sostanze facilmente infiammabili, aveva le seguenti caratteristiche:

- realizzato in acciaio inox AISI 316L;
- capacità pari a 1500 m³;
- diametro 11,90 m e altezza 13,49 m;
- circondato da bacino di contenimento con pareti in cemento armato di altezza costante di 4 m;
- conteneva acetato di etile per conto della Società ABC;
- dotato dei seguenti dispositivi di sicurezza, regolazione e controllo:
 - sistema di inertizzazione e polmonazione con azoto, in comune con altri serbatoi
 - valvola PVRV
 - misuratore di livello a galleggiante LT, con allarme per altissimo livello, riportato sui PC in portineria ed in sala monitori in banchina
 - misuratore di livello radar con 2 soglie di preallarme, allarme per alto livello e per altissimo livello
 - misuratore di pressione (manometro)
 - due passi d'uomo da 600 mm, in posizione diametralmente opposta alla base del serbatoio sulla parete cilindrica
 - passo d'uomo da 600 mm sul tetto del serbatoio
 - organo di presa campioni da 4" (DN 100) sul tetto del serbatoio
 - sistema di iniezione schiuma in 2 punti all'interno del serbatoio
 - sistema di rilevazione atmosfere esplosive
 - sistema di raffreddamento a pioggia sulla corona.

1.3 Dinamica dell'incidente

L'incidente è classificato come 'rilevante' per il superamento delle soglie specificate in allegato VI parte I del D.Lgs. 105/15, relativamente al punto 2 (conseguenze per le persone o i beni): 2 decessi causati da incidente connesso con sostanza pericolosa.

Durante un'operazione di svuotamento/drenaggio del residuo di prodotto dal fondo del serbatoio n. 62, si è verificata un'esplosione con successivo flashfire, che ha determinato il grave danneggiamento del serbatoio ed il decesso di 2 addetti della ditta terza XXX, incaricata di effettuare la suddetta operazione. A causa della deflagrazione l'incidente fu immediatamente avvertito in tutto il deposito e in tutta l'area portuale limitrofa.

A causa della decisione della società ABC di sospendere il noleggio del serbatoio n.62 per lo stoccaggio di acetato di etile, era stato necessario pianificare le operazioni di svuotamento e lavaggio del serbatoio nei giorni immediatamente precedenti l'incidente, dovendo lo stesso accogliere sempre acetato di etile ma della società DFG. In particolare, nella settimana antecedente all'incidente, il serbatoio 62 fu svuotato fino a raggiungere la situazione definita di 'impompabilità', corrispondente ad un volume residuo stimabile in 14 m³ di prodotto. Sabato (4 giorni prima dell'evento) furono soffiate con azoto la linea di scarica nave (6") e di trasferimento dal serbatoio all'autobotte (4"), quindi fu sflangiata la prima e posto un disco cieco sulla seconda. Al termine di queste operazioni furono tolti 16 (dei 20 complessivi) bulloni dal passo d'uomo alla base del serbatoio 62, posto davanti alla scala di ingresso al bacino. L'inertizzazione con azoto gas fu mantenuta sino al giorno dell'intervento, eseguito secondo i passaggi cronologici sottoindicati, immediatamente antecedenti all'esplosione:

- ore 08:10: arrivo del canal-jet della società XXX con n. 3 operatori: sig. C (autista e conduttore del canal-jet), sig. V (operatore) e sig. M (operatore). Riunione tecnico operativa con il Sig. T (responsabile tecnico degli impianti, dipendente dell'azienda madre) e firma del permesso di lavoro, da lui compilato sbarrando le precauzioni da osservare, anche in caso di drenaggio serbatoio, e controfirmato dal Sig. C (responsabile cantiere della ditta XXX). Dopo essere stata ispezionata visivamente attraverso l'apertura del portellone di fondo, la cisterna del canal-jet fu giudicata ancora sporca dal personale preposto aziendale, che decise di rimandarla indietro presso la XXX per essere pulita, e rientrare verso le 9:45.
- Ore 09:45: il canal-jet insieme ai tre operatori rientra in Deposito dopo il lavaggio e, ricevuto il benestare da parte del personale aziendale, si posiziona a fianco del serbatoio 62 per avviare le attività di drenaggio, accompagnato dal responsabile tecnico e dal capo piazzale Sig. S. Dapprima i 2 dipendenti aziendali salgono in cima al serbatoio per chiudere l'azoto (valvola manuale di intercettazione) ed aprire il foro di campionamento da DN100 (4"). Successivamente autorizzano l'apertura del passo d'uomo sul mantello in basso (lato banchina) ad opera del personale XXX, attraverso il quale avviene l'ingresso nel serbatoio della tubazione mobile. Alla base del passo d'uomo, lato serbatoio n. 61, vengono posizionati n. 3 rilevatori di gas portatili (n. 2 aziendali e n. 1 della ditta). Proseguono le operazioni di aspirazione prodotto; la linea di aspirazione, interamente di proprietà della XXX, consisteva in una

tubazione flessibile da 3"- 4" lunga c.a.15 m.



Figure 3-4. Ubicazione serbatoio n. 62

- Ore 11:00: terminata la prima fase di drenaggio con il riempimento del canal-jet, tramite aspirazione di circa 11t di prodotto, viene scollegata la manichetta dal canal-jet che si sposta per raggiungere la postazione di scarico. Il passo d'uomo laterale viene richiuso con 4 bulloni, probabilmente per evitare di trovare un'atmosfera maleodorante all'interno del bacino una volta rientrati. Successivamente l'automezzo si dirige a scaricare il prodotto nei serbatoi 9 e 10, terminato dopo circa un'ora quando la società XXX lascia il Deposito con il canal-jet per la pausa pranzo.
- Ore 13:00: la società XXX (sig. V e sig. M) rientra in postazione per proseguire l'aspirazione del fondo del serbatoio n. 62. Riaperto il passo d'uomo, inserito il tubo ed acceso il canale in aspirazione, con aspirazione di altre 4,4 t di prodotto la fase di svuotamento è praticamente terminata (la tubazione impiegata non riusciva ad aspirare altro).
- Ore 13:20: Il capo piazzale sig. S entra nel bacino di contenimento per rilevare

l'assenza di vapori fuori dal serbatoio, poi si allontana insieme al responsabile tecnico (sig. T) aziendale per recarsi nella palazzina uffici.

- Ore 13:43: esplosione VCE all'interno del serbatoio 62, con distacco del serbatoio dalla base, apertura del fondo e conseguente flashfire all'interno della vasca di contenimento dei vapori fuorusciti nello strappo dal fondo. I due operai della società XXX presenti nella vasca di contenimento morivano uno sul colpo, l'altro dopo poco tempo. Il capo squadra sig. C, che si trovava sul canal-jet posizionato nella viabilità interna di stabilimento, separato dal muro della vasca di contenimento del serbatoio n. 62, rimaneva illeso.

È possibile osservare che le modalità operative con le quali sono state effettuate le operazioni di svuotamento del serbatoio, con chiusura del sistema di polmonazione ad azoto, apertura del bocchello di campionamento superiore da 4" e di uno dei due passi d'uomo laterali, si configurano come un travaso a ciclo aperto. Tale condizione di esercizio ha comportato la formazione di una miscela aria/acetato di etile nel campo di infiammabilità.

1.4 Sostanze coinvolte

La sostanza liquida stoccata nel serbatoio 62 è acetato di etile, classificato H225 *Liquido e vapori facilmente infiammabili* e H336 *Può provocare sonnolenza o vertigini*, ai sensi del Regolamento 1272/2008/CE (CLP). Le principali caratteristiche chimico-fisiche del composto sono:

- flash point = -4°C;
- LEL = 2,2 v/v %; HEL = 11,5%v/v %;
- punto ebollizione = 77,1 °C (101325 Pa);
- punto fusione = -83,8°C;
- densità liquido = 0,9003 g/ml;
- densità vapore = 3,04 (Aria = 1);
- tensione di vapore: 98,3 hPa (T = 20°C), 379 hPa (T = 50°C);

È un liquido di categoria A ai sensi del D.M. 31.07.1934, i cui vapori sono tre volte più pesanti dell'aria. La quantità coinvolta nell'incidente (circa 3 m³) corrisponde al prodotto residuo nel serbatoio che, al momento dell'esplosione, ha subito vaporizzazione istantanea con formazione di fireball.

1.5 Conseguenze dell'incidente

L'incidente ha provocato danni umani e materiali. L'esplosione del serbatoio ha determinato effetti di:

- onda di calore (che ha investito entrambi i 2 lavoratori della ditta XXX deceduti);
- onda di pressione (che ha determinato il sollevamento del serbatoio, la rottura del fondo dello stesso, la proiezione di un lavoratore contro il bacino di contenimento, rottura dei vetri dell'edificio confinante e proiezione di elementi metallici della passerella metallica attigua ai serbatoi

61, 62, 63);

- l'incendio dovuto al fireball, cessato subito a causa del mancato innesco di altri prodotti o sostanze nelle aree investite direttamente dall'esplosione.

È avvenuto il collasso strutturale del serbatoio che si è sollevato dalla propria sede inclinandosi su un fianco, impattando la scala esterna elicoidale del serbatoio adiacente n.61 (fig. 5). Per deflagrazione ha subito una rottura delle linee di saldatura della base dal lato su cui operava l'autocisterna XXX (fig. 6), e una deformazione (rigonfiamento) verso l'esterno della relativa superficie di copertura.



Figura 5



Figura 6

L'evento ha prodotto lo strappo dei cavi di collegamento del serbatoio all'impianto di terra, nonché delle tubazioni di prelievo del prodotto e di quelle relative agli impianti idrico antincendio e di inertizzazione (tubazioni azoto). I muri del bacino di contenimento, in cemento armato, di altezza 4 metri, sono rimasti integri e hanno contenuto gli effetti dell'esplosione e schermato la proiezione di parti metalliche.

L'autocisterna XXX, pur essendo riempita al 40% del prodotto di categoria A ed essendo stata lambita leggermente dall'onda di calore, non ha avuto conseguenze di innesco. Analogamente l'autista dell'autospurgo è rimasto illeso.

L'onda di sovrappressione generata dall'esplosione ha provocato la rottura dei vetri degli infissi di un locale, appartenente al confinante stabilimento CD, collocato a circa 160 metri dal serbatoio n. 62.

2. Analisi dell'incidente

2.1 Cause dirette dell'incidente (ipotizzate) e relative cause di radice (carenze gestionali)

È stato eseguito un procedimento giudiziario da parte della Procura per l'analisi delle cause dell'evento. Dagli elementi raccolti e documentazione consultata sono emerse le seguenti possibili cause dirette dell'incidente:

a) **Presenza di miscela infiammabile-esplosiva all'interno del serbatoio.**

L'acetato di etile è una sostanza liquida che può dare origine a vapori facilmente infiammabili (temperatura d'infiammabilità di - 4° C). Atteso che nel giorno

dell'incidente la temperatura ambiente era notevolmente superiore, è ragionevole ipotizzare la presenza di vapori all'interno del serbatoio in quantità tale che, miscelati con aria in concentrazioni comprese all'interno del campo di infiammabilità (LFL 2,1 % - HFL 11,5 %), costituivano una miscela esplosiva in caso di innesco. Vapori particolarmente "pesanti", presentando una densità relativa pari a circa 3 (rispetto all'aria considerata pari ad 1).

A valle dell'evento il passo d'uomo sul tetto del serbatoio (che presentava un'apertura solo nel foro di campionamento, da DN 100mm) era chiuso, e il passo d'uomo laterale da DN 600mm sul mantello era aperto (quello attraverso cui gli operatori stavano effettuando l'aspirazione del residuo di prodotto). Tale passo laterale è stato chiuso dal personale aziendale per circa due ore, nella mattinata dell'evento, durante la pausa pranzo, per evitare problemi di odori, ed è stato riaperto circa 40 min prima dell'esplosione. Anche il 2° passo d'uomo laterale, posto in posizione diametralmente opposta, risultava chiuso. Tale circostanza, unitamente alla chiusura preliminare del sistema di polmonazione ad azoto, ha ragionevolmente determinato la formazione di una miscela esplosiva aria-infiammabili, consentendo sia una più spinta evaporazione interna del prodotto infiammabile nelle 2 ore di chiusura completa di tutti i passi d'uomo, sia l'introduzione di aria nel serbatoio all'atto della riapertura del 1° passo laterale. L'aria a contatto con i vapori infiammabili, formatisi evidentemente nella giusta concentrazione, in presenza di innesco ha determinato l'esplosione della miscela.

ASPETTI GESTIONALI CONNESSI.

- **3.i. Identificazione delle pericolosità di sostanze e processi, e definizione di criteri e requisiti di sicurezza:** necessaria una più specifica valutazione del rischio che doveva tener conto delle caratteristiche di pericolosità intrinseche del prodotto, riportate nella scheda di sicurezza.
- **3.ii. Analisi di rischio:** l'apertura del passo d'uomo per consentire operazioni di travaso dall'interno del serbatoio, se non avviene in condizioni di sicurezza, introduce un rischio a cui potrebbe associarsi un evento incidentale di incendio e/o di esplosione. Rischio considerato nel RdS, ma ritenuta 'non credibile' la conseguente esplosione per improbabile assenza di fonte di innesco durante il travaso.
- **3.iii. Adeguamenti impiantistici e gestionali per la riduzione del rischio:** l'apertura sul mantello di un passo d'uomo laterale ha leso l'integrità della tenuta del serbatoio, consentendo l'afflusso di aria all'interno, con formazione di un'atmosfera esplosiva che, a seguito di innesco, ha provocato l'esplosione. La rimozione della polmonatura con azoto del serbatoio 62, eseguita dal personale prima dell'apertura del passo d'uomo laterale, ha determinato la sospensione dell'erogazione della sostanza inerte preventiva per la formazione di atmosfere esplosive all'interno del serbatoio (nonostante fosse ancora presente un quantitativo di acetato di etile purissimo dichiarato 'impompabile'

stimabile in c.a. 14 m³ che, in condizioni ordinarie di esercizio, avrebbe dovuto trovarsi in ambiente inerte). Tale quantitativo corrisponde ad un'altezza del residuo all'interno del serbatoio (di diametro pari a 11,90 m) di circa 12-13 cm, tale da poter determinare la miscela di vapori infiammabili con ossigeno in concentrazione ricadente nel "campo di infiammabilità", e tale da consentire l'accensione della miscela con potenziale esplosione e scoppio del serbatoio, come in effetti è accaduto.

- **4.iii. Procedure operative:** mancata predisposizione di una specifica procedura operativa per lo svuotamento di una quantità residua di acetato di etile (dichiarato "impompabile" in quanto non aspirabile con gli impianti a corredo del serbatoio), rilevato in condizioni di assoluta purezza e tecnicamente pompabile mediante pompa antideflagrante. Tale carenza avrebbe determinato l'esecuzione del travaso di liquidi altamente infiammabili secondo istruzioni non dettagliate e non codificate, comunque non evidenziate nella procedura allegata al permesso di lavoro. L'operazione di travaso sarebbe stata effettuata da parte della ditta XXX, ritenuta dalla società 'qualificata per operare in ambienti sospetti di inquinamento o confinati', mediante autospurgo e tubazione in polietilene direttamente pescante nell'acetato di etile. Secondo il gestore lo svuotamento poteva seguire la procedura di stabilimento QSA 44 - *Procedura di drenaggio serbatoio*, allegata al permesso di lavoro, che tuttavia sarebbe non propriamente applicabile in virtù del quantitativo di prodotto puro in gioco (circa 14 m³, circa 13 cm di altezza di battente liquido) che renderebbe l'operazione assimilabile a un vero e proprio 'travaso' anziché 'drenaggio', dovendo comportare il riempimento di circa due autobotti di acetato di etile, in un contesto quindi di rischio potenzialmente assai più severo a causa della presenza maggiore e persistente nell'area di lavorazione di atmosfere potenzialmente esplosive. Pertanto la suddetta QSA 44 non sembrerebbe 'idonea' ad assicurare sufficienti requisiti di sicurezza durante il travaso di prodotti altamente infiammabili aspirati mediante tubazione tipo in polietilene pescante nel liquido dal passo d'uomo laterale, il cui maggiore rischio è collegato non solo al volume di sostanza da travasare, ma anche alla capacità della superficie libera dell'acetato di etile, allo stato purissimo, di emettere vapori in aria, (la superficie evaporante di una pozza, in questo caso pari all'area del serbatoio, risultava di circa 110 mq).

b) Innesco della miscela infiammabile-esplosiva presente all'interno del serbatoio.

L'evento si è originato nella fase di aspirazione dell'acetato di etile eseguita a cura degli operai della Ditta XXX, tramite una linea flessibile da 3"-4" lunga c.a.15 m, costituita da due tubazioni in polietilene/PVC (di cui il tratto di tubo terminale era caratterizzato da un diametro ridotto) unite mediante raccordo filettato, ed inserite all'interno del serbatoio attraverso il passo d'uomo aperto (fig. 6.bis). La seconda

parte della tubazione è rigida e termina in estremità con bocchetta di aspirazione, che l'operatore direzionava per aspirare quanto più prodotto fosse possibile. Il flusso del prodotto era diretto verso l'autocisterna della Ditta XXX (fig. 7).



Figura 6.bis. Passo d'uomo aperto: si evince il tratto terminale del tubo di aspirazione

A valle dell'evento sono stati ritrovati (fig. 7), in prossimità del passo d'uomo laterale chiuso posto sul versante contrapposto a quello aperto, presenti a terra due chiavi combinate in acciaio ed un moncone di tubazione metallica, oltre che dispositivi di protezione individuale degli operai, ed altri effetti personali, tra i quali i telefonini cellulari delle due vittime. Inoltre, risultavano a terra quattro esplosimetri/analizzatori multi-gas/PID, di cui uno collocato in prossimità del passo d'uomo aperto. La bassissima energia di innesco (di circa 0,50 mJ) che caratterizza la sostanza in questione può essere stata facilmente raggiunta a causa della presenza dei succitati attrezzi o utensili ritrovati sul posto (dispositivi non antideflagranti). Tuttavia, dal verbale di ispezione straordinaria SGS emergono 3 ipotesi formulate sulla base dei dati raccolti in ispezione, ed ampiamente discusse in fase di sopralluogo MARS con il gestore:

- I ipotesi - Innesco generato da una scarica elettrica generata dalla tubazione impiegata per il drenaggio, costituita da tratti in materiale dielettrico potenzialmente non antistatico
- II ipotesi - Innesco dovuto a scintille provocate da attrezzatura non ATEX: all'interno del bacino sono state ritrovate due chiavi inglesi, due tubi metallici, potenzialmente non antideflagranti
- III ipotesi - Innesco provocato da uso di cellulare: all'interno del bacino sono stati ritrovati i cellulari delle due vittime, in grado di provocare l'Innesco di gas.

ASPETTI GESTIONALI CONNESSI

- **3.i. - 3.ii Identificazione delle pericolosità di sostanze e processi - analisi di rischio:** nonostante all'interno della scheda SDS fosse esplicitamente indicata la necessità di manipolare l'acetato di etile lontano da fiamme e scintille ed evitando scariche di elettricità statica, accanto al serbatoio 62 risultano essere stati rinvenuti utensileria, telefoni cellulari o DPI indossati non antiscintilla e/o

antistatici.

- **4.i. Identificazione degli impianti e delle apparecchiature soggette ai piani di verifica:** la tubazione composita usata per le operazioni di bonifica dei serbatoi, ritenuta come una possibile fonte di innesco dell'esplosione, non è presente tra gli elementi critici di impianto nel SGS della società.
- **4.iii. Procedure operative e istruzioni nelle condizioni normali, anomale e di emergenza:** carenza nella mancata specifica di modalità operative in sicurezza per lo svuotamento del residuo di acetato, operazione non chiaramente classificata dalla società; non risulta altresì chiaramente definito il quantitativo di "impompabile" che, benchè dichiarato come *residuo di prodotto presente nel serbatoio, che a causa di conformazione del fondo e altezza del tubo pescante non si riesce a prelevare con i sistemi fissi di pompaggio dello stabilimento*, così come inteso dalla società ha portato all'errata interpretazione della procedura da seguire. Il quantitativo di impompabile potrebbe infatti essere al limite tra l'applicazione di una procedura di 'svuotamento' e quella di 'drenaggio' (applicata nel caso). La confusione nella interpretazione delle accezioni di *drenaggio, bonifica, svuotamento*, ha comportato ad un errato 'adattamento' di una procedura operativa esistente, la QSA 44, ad una situazione specifica nella sostanza diversa da quella contemplata dalla procedura stessa, e per la quale la procedura non sembrerebbe essere idonea. Oltre a ciò, si aggiunge che nella procedura QSA 44 è prevista tuttavia una serie di criteri (utilizzo di una pompa antideflagrante, collegamento a terra insieme al corpo della pompa stessa, controllo resistenza elettrica) non sostanzialmente seguiti dagli operatori. Ciò porta a considerare come aspetto SGS carente il mancato rispetto dei criteri di sicurezza indicati nella procedura. Infine, la stessa procedura QSA 44 non esplicita il caso in cui l'operazione di drenaggio sia effettuata da ditta terza, né esplicita chiaramente le mansioni ed i ruoli coinvolti nei passaggi di effettuazione del lavoro.
- **4.v. Approvvigionamento di beni e servizi:** in occasione dell'intervento presso il serbatoio 62, così come più volte in tutte le fasi di drenaggio dei serbatoi contenenti sostanze infiammabili, l'azienda non ha accertato che le attrezzature impiegate dalla Ditta XXX, consentissero di operare in condizioni di sicurezza.
- **5.i Modifiche tecnico - impiantistiche, procedurali e organizzative:** l'adattamento della suddetta procedura QSA 44 alla operazione realmente condotta, si configura come una 'modifica procedurale' non adeguatamente gestita né analizzata sotto il profilo della ricaduta del rischio sulla situazione reale.

c) Esplosione del serbatoio - CVE

L'esplosione è consistita nell'improvviso sviluppo di un'onda di calore associata a un'onda di sovrappressione che ha determinato il cedimento strutturale con sollevamento del serbatoio e forte rumore udibile nell'area portuale.

Sulla base delle evidenze raccolte risulterebbe che l'onda di pressione avrebbe determinato la proiezione dell'addetto XXX sig. V contro il bacino di contenimento del serbatoio; l'onda di calore, con la sua azione termica, avrebbe invece causato danni irreversibili al sig. M, e avrebbe colpito il sig. V, rinvenuto già deceduto al momento dell'intervento dei primi soccorritori.

L'autista dell'autospurgo della XXX, sig. C, che si trovava in corrispondenza dell'automezzo posizionato sulla strada interna dello stabilimento, limitrofa al serbatoio n. 62, è rimasto illeso grazie all'azione mitigatrice del muro del bacino in cemento armato (di altezza 4 m) realizzato a servizio del serbatoio n. 62, che ha schermato l'onda di calore e sovrappressione, nonché la proiezione di frammenti.

ASPETTI GESTIONALI CONNESSI

- **2.i: Definizione delle responsabilità, delle risorse e della pianificazione delle attività:** come da verbale ispezione SGS, a seguito di una dichiarata riorganizzazione delle attività e delle mansioni del personale (recente assunzione del sig. T. come responsabile tecnico e della sicurezza RSP, e nuove mansioni per il Sig. S ex RSP) il Gestore non ha tenuto conto di alcuni aspetti sostanziali e formali. In particolare, il Sig. S. risultava ancora come RSP sull'organigramma, nonostante gli fossero state attribuite altre mansioni, mentre il Sig. T. (nuovo assunto) era in attesa di ricoprire l'incarico di RSP. All'atto dell'incidente, il Direttore era assente e la persona qualificata come RSP destinata ad altro incarico.
- **2.ii-2.iii: formazione ed addestramento del personale interno ed esterno:** si rilevano carenze nel presidio e coordinamento delle operazioni da parte del responsabile della sicurezza e della prima emergenza dell'azienda e della ditta XXX, in modo da consentire il più rapido e efficace controllo delle attività oltre che l'adozione delle prime misure in caso di emergenza. Tale aspetto sarebbe rilevante in quanto risulterebbe che le operazioni, nel momento dell'esplosione, si sarebbero svolte senza la presenza del personale incaricato dell'azienda, avente funzione di supervisione, direzione e intervento in caso di emergenza. Le conseguenze di una mancata formazione specifica, insieme a procedure di lavoro non chiare ed alla mancata chiarezza dei ruoli e delle funzioni del permesso di lavoro, ha comportato:
 - l'esecuzione dell'attività di svuotamento, bonifica e drenaggio con sistemi tecnici pericolosi;
 - errata formulazione del permesso di lavoro;
 - errata esecuzione delle procedure di lavoro.
- **3.iii. Adeguamenti impiantistici e gestionali per la riduzione del rischio:** lo standard costruttivo dei serbatoi presenti all'interno del deposito, in relazione alla necessità di effettuare frequenti cambi prodotto in relazione alle esigenze di mercato, risulta datato. Esistono norme tecniche internazionali che suggeriscono criteri progettuali dei serbatoi (in particolare per i fondi) e modus

operandi per le operazioni di svuotamento e drenaggio, sostanzialmente diversi da quelli impiegati all'interno del deposito, in occasione dell'incidente. Mancata valutazione delle misure di sicurezza adottata in relazione alle attività di fatto svolte.

- **4.iv. Procedure di manutenzione, permessi di lavoro:** nel permesso di lavoro sono evidenziate diverse misure preventive che, all'atto pratico, non è apparso chiaro chi e come dovesse verificarle. Inoltre, come da verbale ispezione SGS, in una check-list relativa ad obblighi da rispettare da parte della ditta terza, in un punto risulta che chiunque entri in stabilimento non debba tenere il cellulare acceso, mentre in un altro punto è specificato che non devono essere introdotte apparecchiature non ATEX, ecc.; il primo punto della check-list è palesemente in contrasto con il secondo.

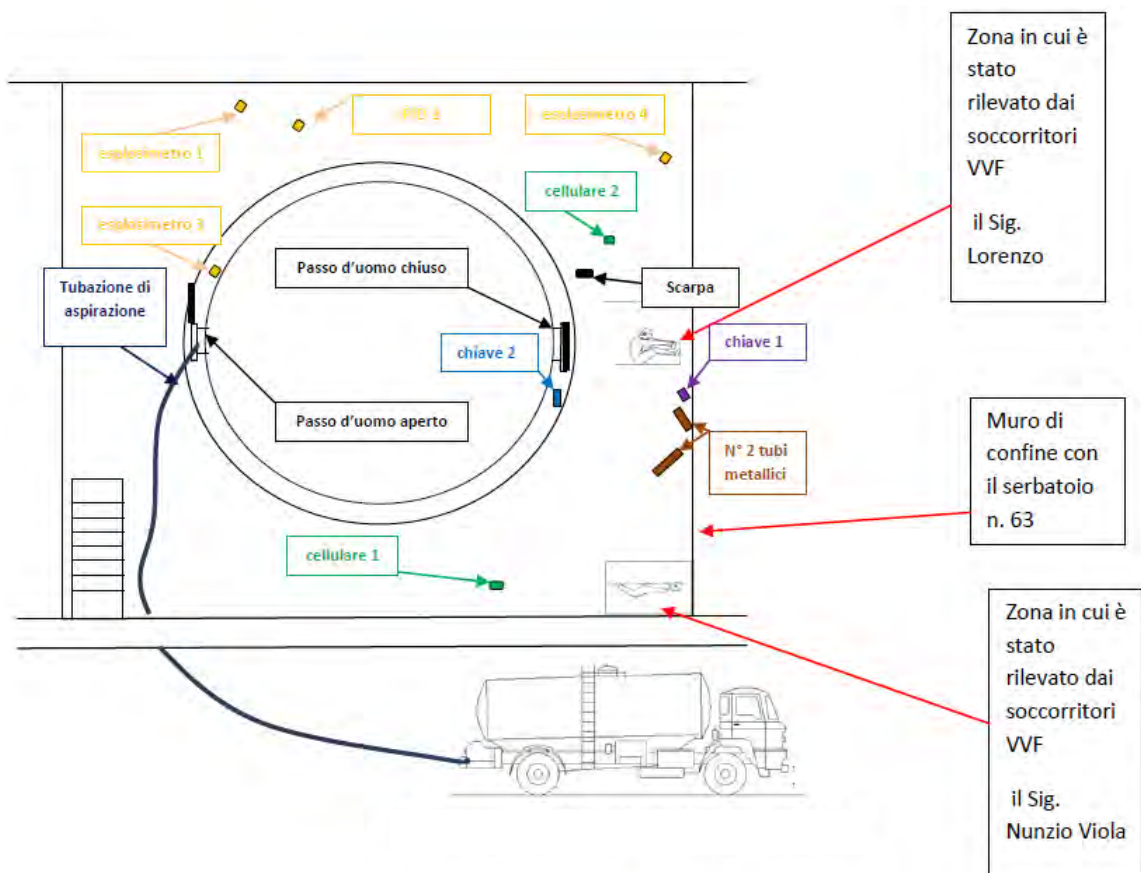


Figura 7. Mappatura delle vittime e degli strumenti rilevati

3. Conclusioni

Il lavoro focalizza l'attenzione sullo specifico aspetto dei rischi connessi con l'operazione di cambio/travaso di prodotti pericolosi da un serbatoio all'altro, operazione diffusa in quasi tutte le suddette attività, ma prevalente nelle realtà di stoccaggio e movimentazione di prodotti chimici. Con particolare riguardo ai liquidi altamente infiammabili, tale operazione è caratterizzata da fasi di delicata gestione, come lo svuotamento, il drenaggio, il travaso, e la bonifica dei serbatoi,

spesso confuse tra loro nelle procedure operative aziendali e nella documentazione SGS. Nel presente lavoro è analizzato un caso studio occorso in un deposito costiero di prodotti chimici, per individuare le criticità connesse alla gestione del suddetto cambio/travasato di prodotto pericoloso tra serbatoi, come cause gestionali dell'evento incidentale stesso, evidenziando in primis come qualunque operazione di drenaggio, svuotamento, bonifica o travaso non possa prescindere da una adeguata e rigorosa valutazione del rischio associato all'operazione specifica stessa.

Bibliografia

[1] D.Lgs. 105/15

[2] Relazione di sopralluogo post-incidente e_MARS, ai sensi dell'articolo 26 del D.Lgs. 105/15

[3] Rapporto finale d'Ispezione redatto dalla Commissione Ispettiva che ha eseguito presso lo stabilimento una verifica ispettiva straordinaria ex art. 27 D.Lgs. 105/15

Principali elementi gestionali critici individuati nelle ispezioni dei SGS-PIR negli stabilimenti RIR ubicati nella provincia di Bologna

B. Conestabile della Staffa¹, A. Lambertini², R. Cerritelli³, G. A. Zuccarello¹, L. Magnani¹

¹ Inail - Uot di Bologna

² Arpae - Presidio Tematico Regionale Impianti a Rischio di Incidente Rilevante

³ Vigili del Fuoco - Direzione Regionale Emilia-Romagna - Ufficio Prevenzione Incendi

Abstract

Il d.lgs. 105/2015 di recepimento della direttiva Seveso III, ha confermato il ruolo centrale delle ispezioni sul Sistema di Gestione della Sicurezza per la Prevenzione degli Incidenti Rilevanti (SGS-PIR). Tali attività, svolte per vigilare su quanto messo in atto dal Gestore per implementare e mantenere attivo il proprio SGS-PIR, nella pratica rappresentano un importante momento di confronto tra le diverse figure che partecipano a vario titolo al procedimento per l'accrescimento del sistema di gestione stesso. I Gestori sono infatti tenuti ad adottare tutte le misure necessarie per prevenire gli incidenti rilevanti e limitarne le conseguenze per la salute umana e l'ambiente.

Scopo del presente lavoro è quello di fare un'analisi dei principali elementi gestionali critici individuati nei sistemi di gestione esaminati durante le ispezioni ordinarie SGS-PIR degli stabilimenti di Soglia Superiore (SS) ed Inferiore (SI), ubicati nella provincia di Bologna, a partire dall'entrata in vigore del d.lgs. 105/2015 ad oggi. Per alcune delle criticità individuate, sarà inoltre indicata l'azione di miglioramento intrapresa dal Gestore. Si è ristretta l'area di analisi alla sola provincia di Bologna, per la varietà di attività industriali svolte, natura e quantità delle sostanze pericolose detenute.

Keywords: rischio incidente rilevante, prevenzione, sistema di gestione della sicurezza, ispezioni.

1. Introduzione

La normativa nazionale vigente, che costituisce un vero e proprio "testo unico" in materia di controllo del pericolo di incidenti industriali, ha convalidato l'assegnazione al Ministero dell'interno delle funzioni istruttorie e di controllo sugli stabilimenti a Rischio di Incidente Rilevante (di seguito stabilimenti RIR) di soglia superiore e alle regioni (o soggetto da esse designate) delle funzioni di controllo sugli stabilimenti di soglia inferiore. Rimangono in capo al Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare (oggi Ministero dell'Ambiente e della

Sicurezza Energetica (MASE)), invece le funzioni di indirizzo, di coordinamento e di monitoraggio, anche ai fini dello scambio di informazioni con l'Unione Europea.

Per gli stabilimenti RIR di soglia superiore in particolare, il decreto prevede che le ispezioni ordinarie vengano effettuate sulla base del Piano nazionale, predisposto dal Ministero dell'Interno in collaborazione con l'Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA), e del programma annuale delle ispezioni, secondo i criteri e le modalità definite all'articolo 27 e in Allegato H al d.lgs. 105/2015 [1].

Le ispezioni, disposte dal Comitato Tecnico Regionale (CTR), sono effettuate da una Commissione ispettiva composta da tre dirigenti e funzionari tecnici appartenenti al Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco (CNVVF), dell'ARPA/ISPRA e dell'INAIL (UNMIG negli stabilimenti di stoccaggio sotterraneo di gas naturale). A tal proposito si segnala che in fase di programmazione del Piano nazionale delle ispezioni, nella composizione delle commissioni operanti nell'area della regione Emilia-Romagna, qualora possibile, si cerca di garantire il principio di rotazione degli ispettori. L'obiettivo è quello di far sì che la stessa Commissione non effettui due verifiche successive in uno stesso stabilimento RIR. Le ispezioni si articolano nelle seguenti fasi:

- invio da parte del CTR del Decreto di nomina della Commissione con mandato ispettivo e indicazione dei nominativi dei componenti della Commissione;
- comunicazione da parte della Commissione ispettiva dell'avvio dell'ispezione;
- svolgimento di più giornate di visita ispettiva secondo le modalità operative descritte in Allegato H;
- trasmissione del rapporto finale di ispezione da parte della Commissione ispettiva al CTR;
- invio del rapporto finale di ispezione da parte del CTR al Gestore dello stabilimento con raccomandazioni e prescrizioni e relativi tempi di adeguamento.

Operativamente, l'ispezione prevede la presenza della commissione in stabilimento in più giornate. In un primo incontro, per lo più conoscitivo, vengono illustrati da parte della Commissione i contenuti del decreto di predisposizione dell'ispezione, vengono acquisiti dal Gestore i format previsti dall'Allegato H e viene effettuato un sopralluogo conoscitivo del sito. Si procede poi con l'esame dell'esperienza operativa, l'effettuazione dei riscontri su SGS-PIR e dei sistemi tecnici adottati in stabilimento, avendo a riferimento i format previsti dall'Allegato H. A riguardo si specifica che nella definizione dei primi mandati ispettivi, per ogni stabilimento veniva richiesta la verifica di tutti i punti della lista di riscontro di cui all'allegato 3 del d.lgs. 105/2015. Per le ispezioni successive, così come previsto all'allegato H, anche sulla base delle risultanze delle ispezioni precedenti o dell'esperienza di incidenti/quasi incidenti, i mandati ispettivi sono stati mirati invece alla verifica di alcuni aspetti specifici del SGS-

PIR, e quindi all'esame di solo alcuni punti della lista di riscontro. Un ulteriore incontro è di solito dedicato alle interviste in campo agli operatori dello stabilimento e ai dipendenti delle ditte terze, qualora presenti, e alle prove di funzionamento e di simulazioni di emergenza. A conclusione, viene redatto il rapporto finale di ispezione e illustrate le risultanze al Gestore.

Le ispezioni ordinarie negli stabilimenti RIR di soglia inferiore invece, devono essere effettuate sulla base di un Piano regionale predisposto dalla Regione o dal soggetto allo scopo incaricato. Di seguito si riporta, come ha trovato applicazione quanto previsto dall'articolo 27, commi 3 e 4 del d.lgs. 105/2015, nella regione Emilia-Romagna.

2. Ispezioni ordinarie SGS-PIR sugli stabilimenti di soglia inferiore in Emilia-Romagna

La regione Emilia-Romagna, con l'emanazione della l.reg. 26/2003 e s.m.i [7] (ultima modifica con l.reg. 30 maggio 2016, n. 9 [8]), che definisce gli adempimenti specifici per gli stabilimenti di soglia inferiore ubicati in regione, e della d.g.r. n. 1239 del 1° agosto 2016 [2], che stabilisce le modalità di presentazione delle Schede Tecniche e le procedure per lo svolgimento di istruttorie e ispezioni, ha attribuito tutte le funzioni amministrative in materia, esercitate prima dalle Province, all'Agenzia Regionale per la Prevenzione, l'Ambiente e l'Energia (ARPAE).

Le ispezioni ordinarie, vengono dunque effettuate sulla base di un Piano regionale di ispezioni pluriennale, con riesame annuale, predisposto da ARPAE, in accordo con la Regione [9]. Tale pianificazione è inviata alla Regione in tempo utile perché sia trasmessa da quest'ultima al MASE entro il 28 febbraio di ogni anno, ai sensi dell'articolo 15, comma 1, lettera b della l.reg. 26/2003 e s.m.i. La normativa regionale prevede, in termini procedurali, per gli stabilimenti RIR di soglia inferiore un percorso parallelo a quello che la norma nazionale identifica per gli stabilimenti di soglia superiore, sia per lo svolgimento delle istruttorie sia per le ispezioni [4]. I gestori degli stabilimenti RIR di soglia inferiore sono infatti tenuti alla presentazione di una Scheda tecnica (compilata secondo le indicazioni fornite nella d.g.r. n. 1239/2016), che fornisca dati ed informazioni sullo stabilimento, sulle sostanze utilizzate, sul sistema di gestione della sicurezza adottato e sugli eventi e scenari incidentali e loro probabilità di accadimento, nonché sugli effetti connessi alle aree di danno ad essi associati.

La presentazione di tale scheda è dovuta anche in adempimento dell'articolo 22, comma 8 del d.lgs. 105/2015, che stabilisce che *"il Gestore degli stabilimenti di soglia inferiore fornisce, su richiesta delle Autorità competenti, informazioni sufficienti sui rischi derivanti dallo stabilimento ai fini della pianificazione territoriale"*.

Per la valutazione e la validazione delle informazioni contenute nella Scheda tecnica, viene svolta una istruttoria da parte del Comitato tecnico di Valutazione del Rischio (CVR) presieduto dal Direttore generale di ARPAE o suo delegato (ad oggi il Direttore tecnico). Vi è la presenza dei Vigili del fuoco, di ARPAE, dell'INAIL,

nonché la partecipazione degli enti di valenza territoriale quali la Regione, le Province, i Comuni e le AUSL. Il Gestore deve inoltre fornire un documento che definisca la propria politica di prevenzione degli incidenti rilevanti e informazioni sul piano di emergenza interna e sul piano di emergenza esterna predisposto dalla prefettura.

La Commissione incaricata dello svolgimento delle ispezioni, ai sensi dell'articolo 15 della l.reg. 26/2003 e s.m.i, è di norma, costituita da tre ispettori rappresentanti ARPAE (con funzione di referente), il Corpo nazionale dei Vigili del fuoco e INAIL.

L'ispezione ordinaria SGS-PIR presso uno stabilimento RIR di soglia inferiore si articola nelle seguenti fasi [5]:

- invio da parte di ARPAE del mandato ispettivo e nomina dei componenti della Commissione;
- comunicazione da parte della Commissione Ispettiva dell'avvio dell'ispezione;
- trasmissione dell'avvio dell'ispezione da ARPAE al MASE e al Comune, per adempiere agli obblighi di cui all'articolo 27, comma 13 del d.lgs. 105/2015.
- comunicazione degli oneri che il Gestore è tenuto a corrispondere e le modalità di pagamento.
- svolgimento di più giornate di visita ispettiva secondo le modalità operative descritte in Allegato H;
- trasmissione del rapporto finale di ispezione da parte della Commissione ispettiva ad ARPAE;
- invio del rapporto finale di ispezione da parte di ARPAE al Gestore dello stabilimento con eventuali raccomandazioni e prescrizioni e relativi tempi di adeguamento, entro quattro mesi dalla conclusione dell'ispezione in analogia a quanto disposto dall'articolo 27, comma 8 del suddetto decreto.

Il rapporto finale di ispezione è altresì inviato da ARPAE al MASE e al Comune, per adempiere agli obblighi di cui all'articolo 27, comma 13 del d.lgs. 105/2015.

Inoltre, tale atto è inviato alla Regione, al Comitato di cui all'articolo 10 del d.lgs. n.105 del 2015, alla Direzione regionale e al Comando provinciale dei Vigili del Fuoco, all'INAIL e alla AUSL territorialmente competente.

ARPAE una volta ricevuta da parte del Gestore la comunicazione di avvenuta ottemperanza, si può avvalere del Comitato per effettuare un eventuale sopralluogo di verifica.

3. Stabilimenti a rischio di incidente rilevante nella regione Emilia-Romagna

Si riportano di seguito alcune statistiche (tabelle e grafici), elaborate da parte degli autori del presente articolo sulla base dei dati relativi agli stabilimenti in regione Emilia-Romagna e in provincia di Bologna. I dati sono stati estrapolati dalla consultazione dell'inventario nazionale degli stabilimenti a rischio di incidenti rilevanti connessi con sostanze pericolose, gestito da ISPRA (consultato a gennaio 2023) [6], e dei rapporti finali redatti dalle Commissioni Ispettive a conclusione delle ispezioni

SGS-PIR ai sensi dell'art. 27 d.lgs. 105/2015 nel periodo di riferimento (anni dal 2015 al 2022).

Al 1° gennaio 2023, sul territorio regionale risultavano in attività 83 stabilimenti a rischio di incidente rilevante (tabella 1) di cui 29 di Soglia Inferiore (SI) e 54 di Soglia Superiore (SS).

| Province Emilia-Romagna | n° stabilimenti SI | n° stabilimenti SS |
|--------------------------------|---------------------------|---------------------------|
| Reggio Emilia (RE) | 5 | 2 |
| Piacenza (PC) | 2 | 2 |
| Parma (PR) | 2 | 2 |
| Ravenna (RA) | 7 | 28 |
| Forlì-Cesena (FC) | 2 | - |
| Rimini (RN) | 1 | 1 |
| Bologna (BO) | 7 | 9 |
| Modena (MO) | 2 | 1 |
| Ferrara (FE) | 1 | 9 |

Fonte: Elaborazione Inail dei dati dell'Inventario nazionale degli stabilimenti RIR (Gennaio 2023)

Tabella 1. Stabilimenti RIR di soglia inferiore e superiore nella regione Emilia-Romagna.

Le province di Ravenna, Bologna e Ferrara sono quelle con il maggior numero di stabilimenti. Analizzando invece gli stabilimenti per tipologia di attività svolta (tabella 2), i più numerosi in regione sono gli impianti chimici. Più del 50% del totale delle aziende chimiche e petrolchimiche della regione, si concentra nelle province di Ferrara, per la presenza del polo chimico industriale, e di Ravenna per la zona industriale e portuale. Abbastanza diffusi sul territorio regionale sono anche i depositi di GPL, seguiti dagli stoccaggi di prodotti combustibili e petroliferi e dai depositi di fitofarmaci e fertilizzanti.

| Attività | | n° stabilimenti | |
|-----------------|---|------------------------|-----------|
| | | SI | SS |
| (03) | Attività minerarie (sterili e processi fisico-chimici) | - | 3 |
| (07) | Trattamento di metalli mediante processi elettrolitici o chimici | 2 | - |
| (08) | Raffinerie petrolchimiche/di petrolio | - | 1 |
| (10) | Stoccaggio di combustibili (anche per il riscaldamento, la vendita al dettaglio ecc.) | 1 | 4 |
| (11) | Produzione, distruzione e stoccaggio di esplosivi | 1 | 1 |
| (12) | Produzione e stoccaggio di articoli pirotecnici | 1 | - |
| (13) | Produzione, imbottigliamento e distribuzione all'ingrosso di gas di petrolio liquefatto (GPL) | 1 | 3 |
| (14) | Stoccaggio di GPL | 8 | 2 |
| (15) | Stoccaggio e distribuzione di GNL | - | 1 |
| (16) | Stoccaggio e distribuzione all'ingrosso e al dettaglio (ad esclusione del GPL) | 2 | 3 |

| | | | |
|------|---|---|----|
| (17) | Produzione e stoccaggio di pesticidi, biocidi e fungicidi | 1 | 7 |
| (18) | Produzione e stoccaggio di fertilizzanti | - | 3 |
| (19) | Produzione di prodotti farmaceutici | 1 | - |
| (20) | Stoccaggio, trattamento e smaltimento dei rifiuti | | 4 |
| (22) | Impianti chimici | 1 | 14 |
| (23) | Produzione di sostanze chimiche organiche di base | - | 1 |
| (24) | Fabbricazione di plastica e gomma | 2 | 1 |
| (28) | Industrie alimentari e delle bevande | 5 | 1 |
| (38) | Fabbricazione di sostanze chimiche (non specificate altrimenti nell'elenco) | 1 | 2 |
| (39) | Altra attività (non specificata altrimenti nell'elenco) | 2 | 3 |

(Fonte: Elaborazione Inail dei dati dell'Inventario nazionale degli stabilimenti RIR (Gennaio 2023))

Tabella 2. Tipologia di attività degli stabilimenti RIR nella regione Emilia-Romagna.

La tabella sopra riportata permette, sia pure in modo qualitativo, di conoscere preventivamente il potenziale pericolo associato. A titolo esemplificativo, per le tipologie di attività maggiormente presenti in regione, quali gli impianti chimici, gli impianti di produzione di prodotti farmaceutici, i depositi di stoccaggio di pesticidi, biocidi e fungicidi, il rischio prevalente sarà quello di incendio e/o esplosione, con eventuale dispersione in atmosfera dei fumi di combustione contenenti sostanze tossiche, anche a distanza, e quindi la possibilità di pericoli, immediati e/o differiti nel tempo, per l'uomo e per l'ambiente.

3.1. Stabilimenti a rischio di incidente rilevante nel territorio provinciale di Bologna

Il territorio provinciale di Bologna ricomprende 16 stabilimenti; 7 di soglia inferiore e 9 di soglia superiore. L'attività svolta dagli stabilimenti è molto varia (tabella 3), sono infatti presenti oltre agli impianti chimici e di stoccaggio GPL, attività di produzione e deposito, ricerca, progettazione, sviluppo e vendita nel settore degli esplosivi, attività di produzione, miscelazione, stoccaggio e imbottigliamento di liquori, attività di trattamento superficiale dei metalli mediante cromatura galvanica.

| | Attività | n° stabilimenti | |
|------|--|-----------------|----|
| | | SI | SS |
| (07) | Trattamento di metalli mediante processi elettrolitici o chimici | 1 | - |
| (10) | Stoccaggio di combustibili (anche per il riscaldamento, la vendita al dettaglio ecc) | - | 1 |
| (11) | Produzione, distruzione e stoccaggio di esplosivi | - | 1 |
| (13) | Produzione, imbottigliamento e distribuzione all'ingrosso di GPL | - | 1 |
| (14) | Stoccaggio di GPL | 2 | 1 |
| (16) | Stoccaggio e distribuzione all'ingrosso e al dettaglio (ad esclusione del GPL) | - | 1 |
| (17) | Produzione e stoccaggio di pesticidi, biocidi e fungicidi | - | 1 |
| (22) | Impianti chimici | - | 2 |

| | | | |
|------|---|---|---|
| (24) | Fabbricazione di plastica e gomma | 1 | - |
| (28) | Industrie alimentari e delle bevande | 1 | - |
| (38) | Fabbricazione di sostanze chimiche (non specificate altrimenti nell'elenco) | 1 | - |
| (39) | Altra attività (non specificata altrimenti nell'elenco) | 1 | 1 |

Fonte: Elaborazione Inail dei dati dell'Inventario nazionale degli stabilimenti RIR (Gennaio 2023)

Tabella 3. Tipologia di attività degli stabilimenti RIR nella provincia di Bologna.

Nella tabella 4 si riportano la tipologia e i quantitativi massimi di sostanze pericolose ai sensi dell'Allegato 1 al d.lgs. 105/2015, che possono essere detenute dagli stabilimenti RIR nella provincia di Bologna.

| Sostanze ricomprese nelle Categorie di cui alla Parte 1 dell'Allegato 1 | Quantità max detenuta (t) |
|---|----------------------------------|
| Sezione «H» — PERICOLI PER LA SALUTE | |
| H1 TOSSICITÀ ACUTA | 130 |
| H2 TOSSICITÀ ACUTA | 1.972 |
| H3 TOSSICITÀ SPECIFICA PER ORGANI BERSAGLIO (STOT) - ESPOSIZIONE SINGOLA STOT SE | 111 |
| Sostanze ricomprese nelle Categorie di cui alla Parte 1 dell'Allegato 1 | Quantità max detenuta (t) |
| Sezione «P» — PERICOLI FISICI | |
| P1a ESPLOSIVI (cfr. nota 8*) | 223 |
| P1b ESPLOSIVI (cfr. nota 8*) | 2.460 |
| P3a AEROSOL INFIAMMABILI (cfr. nota 11.1*) | 14 |
| P4 GAS COMBURENTI | 1.214 |
| P5a LIQUIDI INFIAMMABILI | 41 |
| P5c LIQUIDI INFIAMMABILI | 20.385 |
| P6b SOSTANZE E MISCELE AUTOREATTIVE e PEROSSIDI ORGANICI | 105 |
| P8 LIQUIDI E SOLIDI COMBURENTI | 272 |
| Sezione «E» — PERICOLI PER L'AMBIENTE | |
| E1 Pericoloso per l'ambiente acquatico, categoria di tossicità acuta 1 o di tossicità cronica 1 | 2.874 |
| E2 Pericoloso per l'ambiente acquatico, categoria di tossicità cronica 2 | 2.936 |
| Sezione «O» — ALTRI PERICOLI | |
| 01 Sostanze o miscele con indicazione di pericolo EUH014 | 152 |
| Sostanze ricomprese nelle Categorie di cui alla Parte 2 dell'Allegato 1 | Quantità max detenuta (t) |
| 18. Gas liquefatti infiammabili, categoria 1 o 2 (compreso GPL) e gas naturale (cfr. nota 19*) | 1.452 + 4.379.289* |
| 34. Prodotti petroliferi e combustibili alternativi - Gasolio | 20 |
| * Il dato di 4.379.289 tonnellate è relativo ad uno stoccaggio di gas naturale in giacimento sotterraneo. (Fonte: Elaborazione Inail dei dati estratti dai rapporti finali di ispezione) | |

Tabella 4. Quantitativi massimi di sostanze pericolose detenute dagli stabilimenti RIR nella provincia di Bologna.

Come si evince dalla tabella precedente negli stabilimenti RIR in provincia di Bologna le sostanze pericolose espressamente citate nella Parte 2 dell'Allegato 1 al

d.lgs.105/2015 presenti in maggiori quantitativi sono i gas liquefatti infiammabili per la presenza di uno stoccaggio sotterraneo di gas naturale in giacimento esaurito e di tre depositi di GPL, mentre tra le categorie di sostanze pericolose di cui alla Parte 1 del medesimo Allegato le categorie più diffuse sono la categoria P5c per la presenza in stoccaggio e in lavorazione di liquidi infiammabili, prevalentemente alcool etilico, solventi e vernici infiammabili, le categorie E1 e E2 per la presenza in diversi stabilimenti di varie sostanze classificate pericolose per l'ambiente e la categoria P1a per la presenza di uno stabilimento di produzione di polvere da sparo e cartucce per caccia e tiro sportivo.

4. Elementi gestionali critici individuati nei SGS-PIR esaminati durante le ispezioni ordinarie sugli stabilimenti RIR

Nell'arco del periodo compreso tra il 2015 e il 2022, nella provincia di Bologna, sono state condotte complessivamente 30 ispezioni ordinarie del SGS-PIR; 11 sugli stabilimenti di soglia inferiore e 19 sugli stabilimenti di soglia superiore (grafico 1).

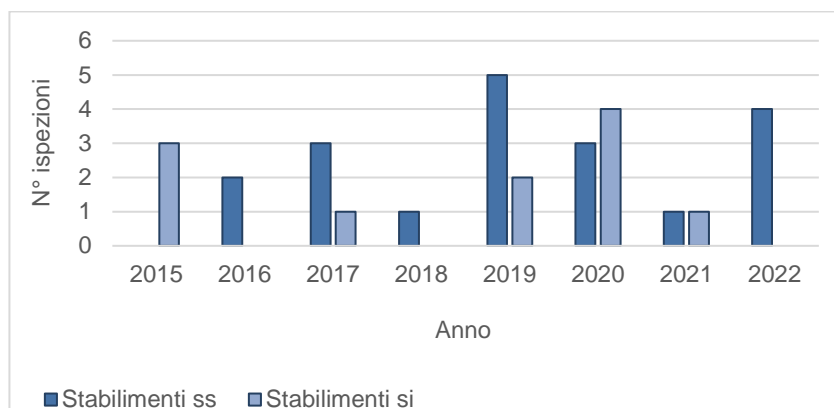


Grafico 1. Numero di ispezioni ordinarie effettuate dal 2015 al 2022 sulla provincia di Bologna.

Le Commissioni incaricate di tali ispezioni, in tutti gli stabilimenti hanno rilevato delle non conformità, che hanno portato alla formulazione di 265 proposte di raccomandazione e 88 proposte di prescrizione, per un totale di 353 non conformità tra minori e maggiori (tabella 5).

| | n° raccomandazioni | n° prescrizioni |
|------------------------|--------------------|-----------------|
| Stabilimenti SS | 153 | 44 |
| Stabilimenti SI | 112 | 44 |

(Fonte: Elaborazione Inail dei dati estratti dai rapporti finali di ispezione)

Tabella 5. Numero di proposte di raccomandazione e di prescrizione per gli stabilimenti RIR ispezionati.

Con riferimento alla specifica numerazione della lista di riscontro di cui all'appendice 3 dell'Allegato H del d.Lgs. 105/2015, l'esame dei rapporti conclusivi, ha chiaramente evidenziato, che i tre aspetti gestionali maggiormente critici nei sistemi di gestione

della sicurezza (tabella 6), sono quelli relativi all'organizzazione e personale (punto 2), al controllo operativo (punto 4) e alla pianificazione delle emergenze (punto 6).

| Elementi SGS-PIR | n° raccomandazioni | n° prescrizioni |
|--|--------------------|-----------------|
| 1. Documento sulla politica di prevenzione, struttura del SGS-PIR e sua integrazione con la gestione aziendale | 26 | 5 |
| 2. Organizzazione e personale | 51 | 25 |
| 3. Identificazione e valutazione dei pericoli rilevanti | 13 | 10 |
| 4. Il controllo operativo | 62 | 15 |
| 5. Gestione delle modifiche | 17 | 1 |
| 6. Pianificazione dell'emergenza | 68 | 29 |
| 7. Controllo delle prestazioni | 20 | - |
| 8. Controllo e revisione | 8 | 3 |

(Fonte: Elaborazione Inail dei dati estratti dai rapporti finali di ispezione)

Tabella 6. Sintesi delle risultanze emerse dall'esame della lista di riscontro sugli elementi SGS-PIR.

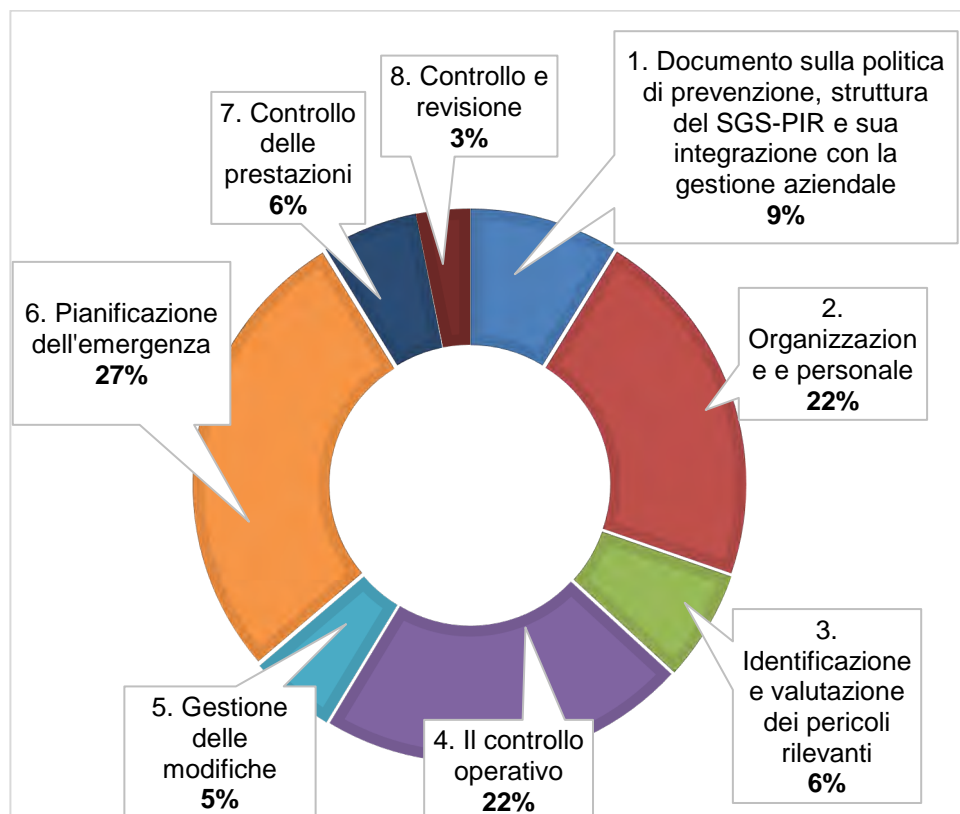


Grafico 2. Sintesi delle risultanze emerse dall'esame della lista di riscontro sugli elementi SGS-PIR in termini percentuali (Fonte: Elaborazione Inail dei dati estratti dai rapporti finali di ispezione).

Delle 353 non conformità, 250 sono quelle rilevate per i tre aspetti gestionali critici (tabella 7), rappresentando circa l'81% (grafico 2).

| Elementi SGS-PIR | | n° raccomandazioni | n° prescrizioni |
|--|---|--------------------|-----------------|
| 2. Organizzazione e personale | | | |
| i. | Definizione delle responsabilità, delle risorse e della pianificazione delle attività | 11 | 4 |
| ii. | Attività di informazione | 16 | 7 |
| iii. | Attività di formazione e addestramento | 23 | 12 |
| iv. | Fattori umani, interfacce operatore ed impianto | 1 | 2 |
| 4. Il controllo operativo | | | |
| i. | Identificazione degli impianti e delle apparecchiature soggette ai piani di verifica | 26 | 9 |
| ii. | Gestione della documentazione | 13 | 1 |
| iii. | Procedure operative e istruzioni nelle condizioni normali, anomale e di emergenza | 1 | 3 |
| iv. | Le procedure di manutenzione | 12 | 2 |
| v. | Approvvigionamento di beni e servizi | 10 | |
| 6. Pianificazione dell'emergenza | | | |
| i. | Analisi delle conseguenze, pianificazione e documentazione | 14 | 8 |
| ii. | Ruoli e responsabilità | 10 | 10 |
| iii. | Controlli e verifiche per la gestione delle emergenze | 20 | 2 |
| iv. | Sistemi di allarme e comunicazione e supporto all'intervento esterno | 10 | 5 |
| v. | Accertamenti sui sistemi connessi alla gestione delle emergenze | 13 | 4 |
| vi. | Sala controllo e/o centro gestione delle emergenze | 1 | |
| Totale | | 181 | 69 |
| (Fonte: Elaborazione Inail dei dati estratti dai rapporti finali di ispezione) | | | |

Tabella 7. Aspetti gestionali maggiormente critici nei sistemi SGS-PIR esaminati.

Tale risultato trova conferma, anche dalla singola analisi dei dati relativi agli stabilimenti di soglia inferiore e a quelli di soglia superiore.

A titolo esemplificativo, alle attività di verifica dei programmi di informazione per le persone che accedono a vario titolo negli stabilimenti, hanno fatto seguito molteplici non conformità, che hanno previsto sostanzialmente, un aggiornamento/miglioramento del foglio informativo per i visitatori. Non di rado, infatti, si rileva in sede di ispezione, la contestuale consegna di fogli informativi diversificati, con riferimenti legislativi non più vigenti, planimetrie non aggiornate, poco leggibili o carenti delle indicazioni delle vie di fuga e dei punti di raccolta, privi di informazioni sulle sostanze pericolose classificate Seveso detenute. Nel maggior parte dei casi, a questi tipi di rilievi, condivisi anche in sede di ispezione con il Gestore, la risposta delle aziende è piuttosto repentina. La non conformità minore viene chiusa, a seguito dell'aggiornato/revisione del foglio informativo. In alcune realtà del

territorio invece, si è verificato il mancato adempimento di quanto richiesto, facendo sì che la proposta di raccomandazione formulata in una prima ispezione, sia stata ripresentata dalla commissione ispettiva successiva come proposta di prescrizione. Numerosi sono anche i rilievi fatti nella verifica dei programmi di formazione e addestramento, per la scarsità dei contenuti sul tema della prevenzione degli incidenti rilevanti (ampio spazio è dato alla formazione obbligatoria dei lavoratori ai sensi del d. lgs. 81/2008), a volte non specifici per il ruolo o la figura professionale per cui vengono rilasciati, per la non definizione dei requisiti e del grado di qualificazione dei formatori.

Sul tema della formazione, addestramento e sensibilizzazione del personale in materia di sicurezza sul lavoro e prevenzione degli incidenti rilevanti, non sempre si ha un riscontro tra quanto riportato in procedura, dove vengono definite le responsabilità, i soggetti interessati, i contenuti, la periodicità della attività di formazione e addestramento, e quanto effettivamente messo in atto. Particolarmente ricorrenti sono le raccomandazioni di attuare o migliorare la verifica della formazione degli addetti interni, delle ditte terze e della squadra di emergenza, con particolare riguardo ai rischi di incidente rilevante, l'integrazione delle dedicate procedure e dei test di verifica dell'apprendimento (per numero esiguo di domande, per assenza di domande relative ai rischi incidenti rilevanti, etc.), oltre che la revisione delle periodicità con cui viene fatta la formazione e l'addestramento.

La tematica dell'informazione e formazione delle ditte terze operanti in forma continuativa o saltuaria all'interno di uno stabilimento a rischio incidente rilevante, all'infuori di quanto specificatamente previsto dal mandato ispettivo, è un punto della lista di riscontro che viene sempre trattato in sede di ispezione. La formazione degli addetti, tranne in casi di aziende particolarmente strutturate, viene demandata sempre alle ditte terze stesse e prevede una sola verifica dell'efficacia della formazione da parte dell'azienda RIR.

L'identificazione degli impianti e delle apparecchiature soggette ai piani di verifica è un altro elemento del sistema di gestione della sicurezza particolarmente critico.

Tra gli elementi di novità introdotti dalla direttiva Seveso III rientra la necessità di dimostrare l'affidabilità degli elementi critici, individuati nell'analisi di rischio.

A seguito della disamina dei rapporti conclusivi, le casistiche più comuni verificate e per cui sono state fatte per lo più proposte di raccomandazione, sono la non esaustiva identificazione degli elementi critici per la sicurezza da parte del Gestore, e in contrapposizione, l'inserimento nei piani di verifica di componenti definiti impropriamente "critici", poiché il loro malfunzionamento non potrebbe dare luogo ad eventi incidentali rilevanti. A conclusione di più ispezioni è stata richiesta anche la definizione del criterio adottato per la loro identificazione, che dovrebbe essere sempre basato sugli esiti delle analisi di rischio.

Secondo quanto riportato all'Allegato 3 del d.lgs. 105/2015, per i gestori degli stabilimenti a rischio di incidenti rilevanti, vi è l'obbligo di adottare, nell'ambito del SGS-PIR, piani di monitoraggio e controllo dei rischi legati all'invecchiamento di

apparecchiature e impianti che tenga conto dei meccanismi di deterioramento presenti, inclusi corrosione interna ed esterna, erosione, fatica termica e meccanica. Nella regione Emilia-Romagna, come in gran parte dell'Italia, il problema del rischio associato all'invecchiamento e alla corrosione degli impianti degli stabilimenti rappresenta un aspetto molto delicato, perché molte delle aziende sono in esercizio da oltre quarant'anni.

Nell'adozione di tale piano, si è registrato un iniziale ritardo, imputabile in parte alla scarsa sensibilità da parte dei Gestori sulla tematica, dall'altra al fatto che doveva essere redatto un piano ex novo. L'errore che comunemente viene fatto da parte del Gestore, e che si rileva in sede di ispezione, è quello dell'identificazione della attrezzatura critica, pur essendo ben definita dalla normativa vigente, e quello di associare l'invecchiamento di una attrezzatura/impianto, al solo tempo trascorso da quando è stato costruito, collaudato o messo in servizio, e non al tempo di vita atteso, caratterizzato invece dal deterioramento e dalla riduzione dell'affidabilità. In tale contesto, fondamentale è il ruolo svolto dal funzionario Inail, che ha il compito di indicare al Gestore quali sono effettivamente le attrezzature/impianti critici da monitorare, anche in funzione del rapporto di sicurezza.

Per l'autovalutazione dell'adeguatezza della gestione dell'invecchiamento, dove applicabile, spesso il Gestore ha fatto ricorso alla linea guida predisposta dal Gruppo di lavoro istituito all'interno del Coordinamento per l'uniforme applicazione sul territorio nazionale di cui all'art.11 del d.lgs. 105/2015 [3]. Talune realtà del territorio, vista la complessità degli impianti e delle attrezzature detenute, per il monitoraggio dell'invecchiamento hanno affiancato anche specifiche attività ispettive, predisponendo una mirata pianificazione degli interventi manutentivi.

Tale strumento, impiegato dalla commissione incaricata dello svolgimento delle ispezioni per decidere eventuali raccomandazioni e/o proposte di prescrizione, in funzione dell'indicatore complessivo, risulta comunque di utilità, qualora compilato in maniera corretta dal Gestore.

Per ciò che concerne la gestione della documentazione, in particolar modo nelle piccole realtà aziendali del territorio, si rilevano difficoltà nelle modalità di raccolta e conservazione di tutta la documentazione di impianto. In questi casi, la commissione oltre a proporre la redazione di apposita procedura o l'integrazione di quella esistente, consiglia al Gestore di considerare la possibilità di adottare un sistema di archiviazione di tipo informatico.

Ultimo aspetto che viene preso in esame è quello della pianificazione delle emergenze.

Dalle commissioni ispettive, in materia, sono state fatte numerose proposte di raccomandazione e prescrizione, tanto da rappresentare il 27% delle non conformità complessive rilevate. Le ragioni di tale anomala situazione potrebbero essere in parte ricondotte al fatto che diverse aziende del territorio, storicamente non assoggettate alla direttiva Seveso, si sono dovute notificare a seguito dell'introduzione del

Regolamento CE n. 1272/2008, relativo alla classificazione, all'etichettatura ed all'imballaggio delle sostanze e delle miscele.

Le tipologie di rilievi fatti, sono molto diversificati tra loro, ma ricorrenti sono la non congruità delle informazioni riportate nel Piano di Emergenza Interna (PEI), con quelle indicate nel Piano di Emergenza Esterna (PEE) e/o nel Rapporto di sicurezza/Scheda tecnica, la non adeguatezza della squadra di emergenza, sia in termini di mezzi che di persone e l'impiego di Dispositivi di Protezione Individuale (DPI) non sempre adeguati in quantità e in tipologia ai rischi da prevenire.

In sede di verifica degli equipaggiamenti di protezione per fronteggiare i rischi in condizioni anomale previste e di emergenza, per esempio, si riscontra di frequente la presenza di uno o più estintori carrellati. Tranne in rare situazioni, è difficile reperire documentazione che attesti la specifica formazione degli operatori autorizzati al loro impiego, così come previsto dal Codice di prevenzione incendi 19 ottobre 2019, e che in prossimità dello stesso ci sia segnalazione del fatto che possa essere impiegato solo da personale specificatamente addestrato (punto S.6.6.2 comma 4 del suddetto Codice).

A quanto detto, nella verifica in campo dei sistemi connessi alla gestione delle emergenze, si è constatata la non comprensibilità da parte degli operatori della cartellonistica di emergenza ed evacuazione, oltre che del segnale di allarme delle sirene, non sempre udibile in tutto il perimetro dello stabilimento RIR ispezionato.

5. Conclusioni

Nel presente articolo, sono stati analizzati 30 rapporti finali di ispezioni SGS-PIR eseguite su stabilimenti di soglia inferiore e superiore site nel territorio provinciale di Bologna. L'obiettivo del lavoro è stato quello di individuare ed analizzare gli aspetti più critici dei SGS-PIR esaminati. Tre sono gli aspetti nodali individuati e sui quali porre attenzione. Il primo aspetto è che degli otto punti della lista di riscontro, solo tre sono particolarmente critici e rappresentano complessivamente l'81% delle non conformità rilevate. Il secondo aspetto è il fatto che tra i punti critici sono ricompresi il controllo operativo e la pianificazione dell'emergenza, elementi essenziali del sistema di gestione della sicurezza. Ultimo aspetto è che il 27% di proposte di raccomandazioni e prescrizione sono state fatte in materia di pianificazione dell'emergenza.

Alla luce di quanto sopra, ai fini di un miglioramento significativo dei SGS-PIR, potrebbe essere utile prevedere nella futura programmazione dell'attività ispettiva nel territorio provinciale, con l'eventuale estensione a livello regionale, la verifica fissa dei tre elementi gestionali critici individuati, con l'eventuale aggiunta dei punti della lista di riscontro di cui all'allegato 3 del d.lgs. 105/2015, che dalle precedenti verifiche ispettive erano risultati meno critici.

6. Bibliografia

- [1] Decreto Legislativo 26 giugno 2015, n. 105 - "Attuazione della direttiva 2012/18/UE relativa al controllo del pericolo di incidenti rilevanti connessi con sostanze pericolose" (G.U. n. 161 del 14 luglio 2015 - Supplemento ordinario 38/L).
- [2] Deliberazione della Giunta Regionale Emilia-Romagna del 1° agosto 2016, n. 1239 - "Nuova Direttiva per l'applicazione dell'articolo 2 della L.R. 26/2003 e s.m.i. recante disposizioni in materia di pericoli di incidenti rilevanti connessi con determinate sostanze pericolose" (BUR n. 261 del 24 agosto 2016).
- [3] https://www.mase.gov.it/sites/default/files/archivio/allegati/rischio_industriale/li_neaguidainvecchiamento2021.pdf
- [4] <https://ambiente.regione.emilia-romagna.it/it/aria-rumore-elettrosmog/temi/stabilimenti-a-rischio-di-incidente-rilevante>
- [5] <https://www.arpae.it/it/temi-ambientali/rischio-industriale/ispezioni-sgs-pir-negli-stabilimenti-di-soglia-inferiore>
- [6] <https://www.rischioindustriale.isprambiente.gov.it/seveso-query-105/Default.php>
- [7] Legge regionale Emilia-Romagna del 17 dicembre 2003, n. 26 - "Disposizioni in materia di pericoli di incidenti rilevanti connessi con determinate sostanze pericolose".
- [8] Legge regionale Emilia-Romagna del 30 maggio 2016, n. 9 - "Legge Comunitaria Regionale per il 2016" - Titolo II Capo I - (BUR n. 158 del 30 maggio 2016).
- [9] Sistema Nazionale per la Protezione dell'Ambiente, "Rapporto Controlli, Monitoraggi Ispezioni Ambientali SNPA AIA-RIR relativi ai dati del 2020" (Delibera del Consiglio SNPA Seduta del 07.09.2022 Doc.n.189/22).

Un approccio sistemico per rappresentare la Direttiva Seveso III

A.J. Nakhal Akel¹, F. Simone¹, V. Franzoni¹, A. Alvino², S.M. Ansaldi², M. R. Vallerotonda², M. F. Milazzo³, R. Patriarca¹

¹ Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Aerospaziale, Università di Roma Sapienza

² Inail - Dit

³ Dipartimento di Ingegneria, Università di Messina

Abstract

Gli incidenti relativi all'utilizzo di sostanze pericolose in ambito industriale risultano particolarmente critici data la possibilità di generare effetti sui lavoratori, sulle attrezzature d'impianto, ma anche sulla salute pubblica e l'ambiente. L'attuale complessità degli impianti e dei processi complica ulteriormente la prevenzione degli incidenti essendo le operazioni caratterizzate da un'ampia gamma di fattori, sia tecnologici che umani. In questo contesto, la Direttiva Seveso III (2012/18/UE) gioca un ruolo fondamentale stabilendo obblighi e responsabilità delle aziende che utilizzano, producono o immagazzinano sostanze pericolose. Tuttavia, la gestione degli incidenti rilevanti richiede una continua analisi dei sistemi industriali che comportano una varietà di interazioni in continua evoluzione nel tempo. A questo scopo si propone l'utilizzo del modello STAMP (System-Theoretic Accident Model and Processes) per l'analisi dei processi basata su un approccio sistemico volto a identificare le cause principali degli incidenti tramite la definizione di relazioni "controllore/processo controllato". Questo documento ha, quindi, lo scopo di proporre la trasposizione della Direttiva Seveso III e del D.lgs. 105/15, con cui è stata recepita in Italia, in una struttura di controllo basata su STAMP, fornendo le basi per una modellistica ad ampio spettro capace di integrare informazioni operative di processo, così come dati sugli aspetti organizzativi. Viene presentato un modello di struttura di controllo che possa essere inteso, in futuro, come un riferimento per varie realtà aziendali che ricadono nella normativa Seveso. Questa base modellistica permette una mappatura socio-tecnica che può essere utilizzata come base per raggiungere una valutazione completa e sistematica dei rischi associati agli stabilimenti Seveso.

Keywords: Teoria dei sistemi, impianti industriali, gestione del rischio, direttiva Seveso III.

1. Introduzione

Il panorama industriale ha subito radicali cambiamenti con l'avvento della quarta rivoluzione industriale, la cosiddetta Industry 4.0, ed il continuo progresso tecnologico. Ciò ha trasformato le organizzazioni in sistemi socio-tecnici, ossia sistemi composti da elementi sociali e tecnologici correlati e interdipendenti, che si

influenzano a vicenda per mantenere la loro attività e l'esistenza del sistema stesso permettendo di perseguire il loro obiettivo. Industry 4.0 ha portato ad un aumento della produttività e dell'efficienza, ma anche ad una tale complessità dei sistemi industriali che implica il dover affrontare nuove sfide per la sicurezza dei lavoratori e la tutela dell'ambiente [1], [2]. Le nuove tecnologie industriali introducono nuovi rischi, in particolare quelli legati alla complessità degli impianti, alla presenza di macchinari altamente automatizzati e alla manipolazione di sostanze pericolose. La sicurezza, dunque, gioca un ruolo fondamentale in questo campo poiché gli incidenti possono avere conseguenze disastrose per le persone e organizzazioni coinvolte e per l'ambiente circostante. Ciò ha portato l'Unione Europea a redigere la Direttiva Seveso III (2012/18/UE) [3], [4] recepita in Italia con il D.lgs. 105/15, in cui sono definiti obblighi e responsabilità delle aziende che utilizzano, producono o immagazzinano sostanze pericolose. Tale decreto ribadisce il concetto di potenziali pericoli di incidente rilevante e l'obbligo di implementare un Sistema di Gestione della Sicurezza per la prevenzione degli incidenti rilevanti (SGS PIR) efficace. Esso, inoltre, sottolinea l'importanza del flusso di informazioni all'interno e tra le organizzazioni, nonché la comunicazione di tali informazioni alle autorità competenti e al pubblico, migliorando la sicurezza e la trasparenza nel contesto industriale.

Nonostante ciò, la complessità e il dinamismo dei sistemi industriali e dei processi coinvolti rendono l'analisi e la prevenzione degli incidenti una sfida continua data la difficoltà di identificare tutte le fonti di rischio e valutarne l'impatto [5], [6]. Recentemente sono stati sviluppati nuovi approcci qualitativi integrati basati sulla Teoria dei Sistemi, come System-Theoretic Accident Model and Process (STAMP), che permettono la modellazione del sistema complesso come un insieme di componenti correlati mantenuti in uno stato di equilibrio dinamico da cicli di controllo o di retro-alimentazioni. Tale metodologia suggerisce la visione degli incidenti come risultato di processi imperfetti intesi come processi che coinvolgono interazioni tra persone, strutture sociali e organizzative, attività ingegneristiche e componenti del sistema tecnico-operativo che portano a violare i vincoli di sicurezza del sistema. Rilevare le cause alla radice degli incidenti piuttosto che i meccanismi superficiali che li scatenano consentirà alle organizzazioni di avere un approccio proattivo alla gestione della sicurezza e alla valutazione del rischio, abilitando azioni di prevenzione prima che si verifichi un evento negativo e minimizzandone le eventuali conseguenze [7].

La "Seveso" è regolata da una legislazione vincolante a livello sovranazionale, nazionale e regionale; vi sono poi le normative tecniche volontarie, gli standard di fatto, le prassi consolidate e la cultura condivisa, che condizionano e indirizzano l'ambito Seveso. Questo documento propone la trasposizione della Seveso in una struttura di controllo basata sul modello STAMP con il fine di fornire alle organizzazioni uno strumento di analisi qualitativo per la prevenzione di incidenti rilevanti. Sebbene la legislazione in materia di sicurezza esista da tempo e abbia subito molti cambiamenti volti al suo miglioramento, non è ancora riflessa in un modello generale di analisi dei rischi che possa integrare le normative di settore,

legislazione e direttive. L'obiettivo di questo lavoro è, quindi, quello di creare un modello di struttura di controllo che possa essere inteso, in futuro, come un riferimento per le diverse realtà aziendali che utilizzano, producono o immagazzinano sostanze pericolose. Il modello verrà istanziato sui meccanismi volti a coordinare e gestire le ispezioni in impianti Seveso.

2. Metodologia

Il System-Theoretic Accident Model and Processes (STAMP) è un modello di analisi che indaga le interazioni tra componenti del sistema. Il modello STAMP è la base di altre tecniche come la Causal Analysis based on System Theory (CAST) e la System-Theoretic Process Analysis (STPA). Quest'ultime indagano a fondo le cause degli incidenti, considerandoli degli eventi di perdita non pianificati e indesiderati, non solo dovuti a guasti di componenti tecnologici, ma anche da disturbi esterni al sistema, dalle interazioni tra i suoi componenti, ed i comportamenti che deviano dalle normali condizioni operative incrementando lo stato di rischio [8]. L'utilizzo sinergico all'interno delle organizzazioni di risorse umane e automazione ha dato vita a nuove relazioni socio-tecniche che, se gestite in modo inadeguato, potrebbero generare gravi conseguenze. Vi è, quindi, la necessità di strategie di gestione più avanzate in grado di affrontare efficacemente le incertezze e la non linearità delle interazioni intrinseche ai sistemi. Lo STAMP supera queste difficoltà basandosi su tre principi fondamentali [6], [9]:

1. vincoli di sicurezza: questi vincoli nascono dall'idea che gli incidenti non sono causati da una catena di eventi, ma come conseguenza di vincoli non efficacemente applicati. Si tratta, infatti, di regole o limiti imposti da un controllore per garantire che il processo controllato funzioni in sicurezza, stabilendo i requisiti di sicurezza e le condizioni critiche che non possono essere violate;
2. struttura di controllo: i sistemi sono visti come strutture di controllo gerarchiche in cui i livelli superiori controllano i livelli sottostanti tramite azioni di controllo volte a soddisfare i vincoli di sicurezza imposti al fine di prevenire gli incidenti. D'altronde, i livelli inferiori comunicano il proprio stato tramite dei feedback che avvisano se i vincoli di sicurezza sono rispettati;
3. modello di processo: ogni controllore ha un modello del processo che controlla, il quale descrive le relazioni tra i componenti, lo stato operativo del sistema e il modo in cui questo stato potrebbe evolversi al fine di controllarlo efficacemente.

La Figura 1 rappresenta una struttura di controllo concettuale costituita da tre livelli gerarchici [8], [10]. In basso troviamo il processo fisico controllato da un controllore automatico. Questo costituisce il livello intermedio in quanto è sia controllore che processo a sua volta controllato dal livello gerarchico superiore (costituito da un controllore umano).

Partendo dall'alto troviamo il controllore umano: questo ha la responsabilità di controllare il controllore automatico che a sua volta controlla il processo fisico. Il controllore umano possiede la conoscenza del processo industriale e dell'automazione con cui si interfaccia, (definiti rispettivamente in Figura 1). Questa conoscenza, unita alla sua procedura decisionale definita in Figura 1 "Generatore di Azioni di Controllo", elabora azioni di controllo volte a far rispettare e rafforzare i vincoli di sicurezza del sistema. Pertanto, attraverso i suoi elementi di controllo il controllore umano ha la possibilità di applicare azioni correttive sulla macchina, ad esempio modificandone le istruzioni o le procedure di sicurezza, o semplicemente facendole rispettare. Inoltre, il controllore valuterà i feedback della macchina attraverso degli indicatori.

Il livello successivo è il controllore automatico. Quest'ultimo rappresenta un livello intermedio in quanto è sia controllato dall'operatore umano (come descritto precedentemente) sia controllore del processo fisico sottostante. Il controllore automatico, quindi, a sua volta raccoglie i feedback del processo fisico sottostante ed utilizza queste variabili di controllo per garantire il corretto funzionamento del sistema. Tali variabili vengono misurate da un sensore che le riporta all'algorithm di controllo della macchina. Questo è costituito da un insieme di regole, istruzioni e comandi che, sulla base dei feedback genera azioni di controllo (sempre confrontati con il modello di processo per garantire lo status desiderato). Le azioni di controllo sono implementate da attuatori direttamente sul processo fisico.

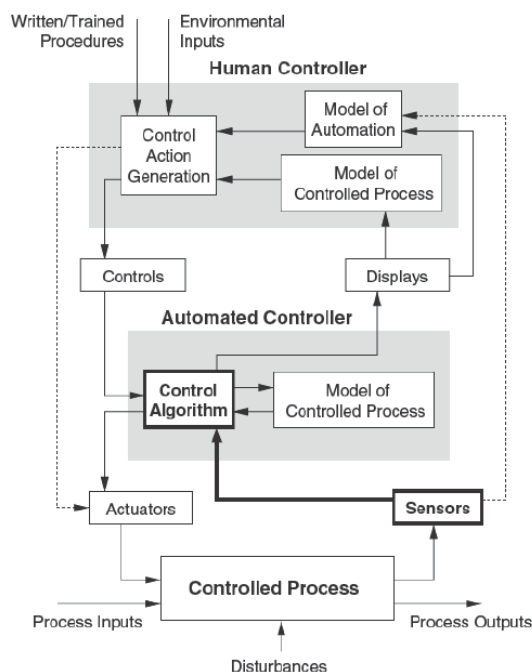


Figura 1. Struttura di controllo relativa ad un sistema Operatore - Automazione - Processo Controllato [8].

L'ultimo livello è il processo tecnico-operativo che riceve gli input di processo e li trasforma in output. Esso è controllato dal controllore automatico al fine di prevenire

il verificarsi di incidenti. Per questo motivo vengono rappresentati elementi di disturbo con lo scopo di introdurre alterazioni dei parametri o potenziali errori nelle misure che attivano le azioni di controllo della sicurezza. Le frecce tratteggiate rappresentano: (i) il caso in cui il controllore automatico sia fuori servizio o non possa svolgere le sue funzioni e, quindi, il feedback del processo fisico e le eventuali azioni correttive devono essere rilevate e stabilite direttamente dal controllore umano, (ii) altre attività che necessitano di essere svolte manualmente dal controllore umano, ad esempio, la manutenzione, i controlli visivi e le ispezioni. Si noti come una struttura gerarchica come in Figura 1 possa essere utilizzata anche per mappare le relazioni del sistema a più livelli (i.e., tecnico, organizzativo e manageriale)

3. Modello STAMP della Direttiva Seveso III

La Direttiva Seveso III è una normativa europea redatta con il fine di regolamentare e stabilire precise indicazioni per la prevenzione e il controllo di incidenti rilevanti che possono verificarsi in uno stabilimento in cui sono utilizzate sostanze pericolose [3], [4]. In particolare, l'analisi critica della Direttiva Seveso III e del suo decreto di recepimento, delle norme tecniche relative al sistema di gestione della sicurezza per la prevenzione degli incidenti rilevanti, di esempi di processi produttivi di aziende del settore Seveso hanno consentito di ottenere una versione preliminare del modello STAMP per alcune componenti ad alto livello riportato in Figura 2. L'insieme degli attori coinvolti, degli obblighi, dei ruoli e delle responsabilità definite in tale normativa sono stati mappati nella struttura di controllo in modo da creare una rappresentazione delle strutture di controllo del sistema. La struttura di controllo di Figura 2 fornisce un riferimento generale del D.lgs. 105/15 per la realizzazione di un SGS tra le Autorità Legislative e regolamentari, la Commissione Ispettiva, il Gestore e il Responsabile del Servizio di Prevenzione e Protezione (RSPP), la stesura della documentazione, la gestione delle informazioni, delle comunicazioni e delle azioni correttive volte a prevenire gli incidenti per tutte le organizzazioni soggette alla normativa Seveso [11], [12].

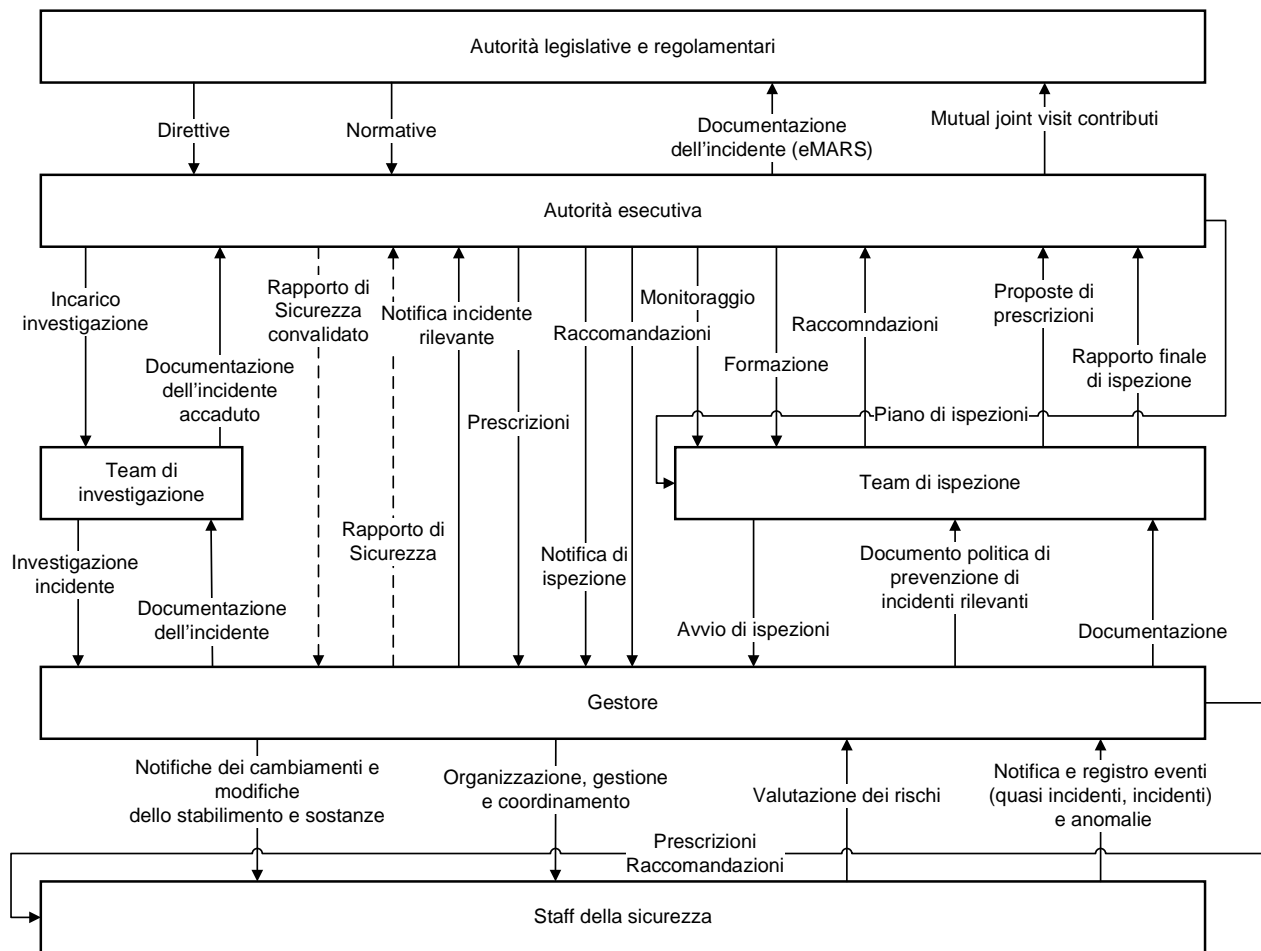


Figura 2. Struttura di controllo per la messa in atto di un Sistema di Gestione della Sicurezza.

La Figura 2 in particolare descrive tutte le relazioni della parte alta della catena manageriale, dovendo queste essere applicabili ad ogni tipo di organizzazione che utilizza sostanze pericolose a prescindere dai processi applicati. In tal senso, nei seguenti paragrafi viene fornita una descrizione maggiormente dettagliata degli attori (i.e., blocchi) della struttura di controllo con le loro relazioni rappresentati i loro obblighi così come evidenziati nel D.lgs 105/15. Si noti che il Rapporto di Sicurezza (RdS) (documento obbligatorio per gli stabilimenti di soglia superiore e fondamentale per la valutazione e gestione dei rischi al fine di garantire la sicurezza delle persone, degli asset industriali e dell'ambiente) è riportato con delle linee tratteggiate per indicare che è un documento indirettamente coinvolto nelle ispezioni SGS-PIR e si chiede al Gestore di visionarlo in alcune parti per verificare che vi sia coerenza con le attività e gli altri documenti predisposti ed attuati in azienda.

Le sezioni che seguono riportano in modo isolato e dettagliato le relazioni tra gli agenti descritti precedentemente nel modello STAMP (cf. Figura 2). Pertanto, ogni sezione descrive nello specifico un unico agente in relazione agli altri agenti del processo con cui interagisce.

3.1. Autorità legislative e regolamentari

Al vertice del modello si trovano le Autorità legislative e regolamentari, ossia le autorità europee ed italiane (nello specifico Ministero dell'Ambiente e Ministero dell'Interno) che hanno potere legislativo in materia. Il Ministero dell'Ambiente, oltre alle funzioni di valutazione e controllo, esercita funzioni di indirizzo e coordinamento in materia e provvede allo scambio di informazioni con la Commissione Europea e gli Stati membri dell'Unione. Il Ministero dell'Interno, in collaborazione con ISPRA, predispone il piano nazionale di ispezioni SGS-PIR per gli stabilimenti di soglia superiore e coordina la programmazione di tali ispezioni predisposta dai Comitati Tecnici Regionali (CTR) competenti per territorio. Le Regioni, invece, predispongono piani di ispezioni per gli stabilimenti di soglia inferiore siti nell'ambito dei rispettivi territori.

Nel d.lgs. 105/15 sono riportati alcuni parametri di riferimento che definiscono i criteri di valutazione generali sopra indicati e che, presi in considerazione separatamente o in combinazione, possono fornire, ove applicabili, elementi utili per stabilire le priorità per la programmazione delle ispezioni. In Tabella 1 sono descritte le relazioni che esistono tra le Autorità legislative e regolamentari e gli altri componenti del sistema e sono identificate le azioni di controllo e feedback coinvolti tra gli elementi.

| Autorità legislative e regolamentari | | |
|--|---|--|
| Controllore di | Azioni di controllo imposte sulle entità controllate | Feedback inviato dalle entità controllate |
| <ul style="list-style-type: none"> Autorità esecutiva | <ul style="list-style-type: none"> Direttive Norme di settore | <ul style="list-style-type: none"> Documentazione dell'incidente (eMARS) Mutual joint visit contributi |
| Controllato da | Azioni di controllo imposte dalle entità controllori | Feedback inviato alle entità controllori |
| <ul style="list-style-type: none"> Nessuno | <ul style="list-style-type: none"> Nessuna | <ul style="list-style-type: none"> Nessuno |

Tabella 1. Descrizione delle relazioni delle Autorità legislative e regolamentari.

3.2. Autorità esecutiva

L'autorità esecutiva è svolta dagli Organi Tecnici dei Ministeri competenti, ossia da tecnici di Ispra/Arpa, Inail, ISS e Corpo nazionale dei Vigili del fuoco in relazione alle proprie specifiche competenze. Tali Organi possono elaborare e promuovere programmi di formazione in materia di rischi di incidenti rilevanti e, soprattutto, svolgono molteplici attività a garanzia della sicurezza degli stabilimenti soggetti a normativa Seveso attraverso le istruttorie dei rapporti di sicurezza e le ispezioni sui sistemi di gestione. Durante tali attività l'attenzione viene posta anche sui piani di manutenzione e controllo, pianificati e svolti dal Gestore sulle attrezzature, al fine di verificare la conformità alle norme di legge. In caso di incidente l'Autorità esecutiva può richiedere monitoraggi ambientali per valutare l'eventuale impatto sull'ambiente. La comunicazione con il pubblico riguardo ai rischi associati agli

stabilimenti a rischio di incidente rilevante e il coinvolgimento di questo nelle decisioni riguardanti la sicurezza completano il suo ruolo fondamentale nella protezione della salute e dell'ambiente. La Tabella 2 descrive le relazioni che esistono tra l'autorità esecutiva e le altre figure coinvolte nelle attività Seveso e, inoltre, identifica le azioni di controllo e feedback tra gli elementi.

| Autorità esecutiva | | |
|--|--|---|
| Controllore di | Azioni di controllo imposte sulle entità controllate | Feedback inviato dalle entità controllate |
| <ul style="list-style-type: none"> • Team di investigazione | <ul style="list-style-type: none"> • Incarico investigazione | <ul style="list-style-type: none"> • Documentazione dell'incidente accaduto |
| <ul style="list-style-type: none"> • Team di ispezione | <ul style="list-style-type: none"> • Formazione ispettori • Monitoraggio esiti ispezioni | <ul style="list-style-type: none"> • Proposte di prescrizioni • Raccomandazioni • Rapporto finale di ispezione |
| <ul style="list-style-type: none"> • Gestore | <ul style="list-style-type: none"> • Prescrizioni • Raccomandazioni • Notifica di avvio di ispezione • Rapporto di Sicurezza convalidato | <ul style="list-style-type: none"> • Notifica incidenti rilevanti • Rapporto di Sicurezza |
| Controllato da | Azioni di controllo imposte dalle entità controllori | Feedback inviato alle entità controllori |
| <ul style="list-style-type: none"> • Autorità legislative e regolamentari | <ul style="list-style-type: none"> • Direttive • Norma | <ul style="list-style-type: none"> • Documentazione dell'incidente (eMARS) • Mutual joint visit contributi |

Tabella 2. Descrizione delle relazioni dell'autorità esecutiva.

3.3. Team di ispezione

L'ispezione sul SGS-PIR dello stabilimento viene svolta da una Commissione costituita da funzionari appartenenti a Ispra/Arpa, Inail e CNNE. Tale Commissione ha il compito di valutare ed ispezionare tutta la documentazione fornita e richiesta al Gestore al fine di individuare eventuali inadempimenti alle indicazioni di legge e rilevare la necessità di azioni correttive da apportare ai fini della prevenzione di incidenti rilevanti. In Tabella 3 sono descritte le relazioni che esistono tra la Commissione ispettiva e gli altri componenti del sistema, inoltre, sono identificate le azioni di controllo e feedback coinvolti tra gli elementi.

| Team di ispezione | | |
|--|--|---|
| Controllore di | Azioni di controllo imposte sulle entità controllate | Feedback inviato dalle entità controllate |
| <ul style="list-style-type: none"> • Gestore | <ul style="list-style-type: none"> • Avvio di ispezione | <ul style="list-style-type: none"> • Documentazione (piani di manutenzione, programmi di formazione, ecc.) • Documento politica di prevenzione di incidenti rilevanti |
| Controllato da | Azioni di controllo imposte dalle entità controllori | Feedback inviato alle entità controllori |
| <ul style="list-style-type: none"> • Autorità esecutiva | <ul style="list-style-type: none"> • Formazione • Monitoraggio | <ul style="list-style-type: none"> • Rapporto finale di ispezione • Proposte di prescrizioni • Raccomandazioni |

Tabella 3. Descrizione delle relazioni del team di ispezione.

3.4. Team di investigazione

La investigazione riferita agli incidenti rilevanti nell'ambito degli stabilimenti Seveso si concentra sull'analisi delle cause, delle dinamiche e delle conseguenze degli eventi accidentali che hanno avuto o potrebbero avere un impatto significativo sull'ambiente circostante e sulla sicurezza delle persone. L'obiettivo principale dell'investigazione è identificare le cause alla base dell'incidente e comprendere come esso si sarebbe potuto evitare o gestire in modo più efficace. Gli aspetti decisivi dell'indagine includono l'analisi delle procedure operative, l'efficacia delle misure di prevenzione, la risposta alle emergenze, il rispetto delle normative di sicurezza, il ruolo del personale coinvolto e il monitoraggio ambientale.

La Tabella 4 descrive le relazioni che esistono tra il team di investigazione e gli altri componenti del sistema; inoltre, la Tabella 4 identifica le azioni di controllo e feedback coinvolti tra gli elementi.

| Team di investigazione | | |
|--|--|--|
| Controllore di | Azioni di controllo imposte sulle entità controllate | Feedback inviato dalle entità controllate |
| <ul style="list-style-type: none"> • Gestore | <ul style="list-style-type: none"> • Investigazione incidente | <ul style="list-style-type: none"> • Documentazione dell'incidente |
| Controllato da | Azioni di controllo imposte dalle entità controllori | Feedback inviato alle entità controllori |
| <ul style="list-style-type: none"> • Autorità esecutiva | <ul style="list-style-type: none"> • Incarico investigazione | <ul style="list-style-type: none"> • Documentazione dell'incidente accaduto |

Tabella 4. Descrizione delle relazioni del team di investigazione.

3.5. Gestore

Il Gestore è "qualsiasi persona fisica o giuridica che detiene o gestisce uno stabilimento o un impianto in cui sono presenti sostanze pericolose, oppure a cui è stato delegato il potere economico o decisionale determinante per l'esercizio tecnico dello stabilimento o dell'impianto stesso" (ex art. 3 del d.lgs.105/15). In Tabella 5 sono descritte le relazioni che esistono tra il Gestore e gli altri componenti del sistema, inoltre, sono identificate le azioni di controllo e feedback coinvolti tra gli elementi.

| Gestore | | |
|--|---|--|
| Controllore di | Azioni di controllo imposte sulle entità controllate | Feedback inviato dalle entità controllate |
| <ul style="list-style-type: none"> Staff della sicurezza | <ul style="list-style-type: none"> Organizzazione, gestione e coordinamento Notifiche dei cambiamenti e modifiche d'impianto e sostanze | <ul style="list-style-type: none"> Valutazione dei rischi Notifica e registro eventi (quasi incidenti, incidenti) e anomalie |
| Controllato da | Azioni di controllo imposte dalle entità controllori | Feedback inviato alle entità controllori |
| <ul style="list-style-type: none"> Autorità esecutiva | <ul style="list-style-type: none"> Prescrizioni Raccomandazioni Notifica di avvio ispezione Rapporto di Sicurezza convalidato | <ul style="list-style-type: none"> Notifica incidenti rilevanti Rapporto di Sicurezza |
| <ul style="list-style-type: none"> Team di ispezione | <ul style="list-style-type: none"> Avvio di ispezione | <ul style="list-style-type: none"> Documento politica di prevenzione di incidenti rilevanti Documentazione |
| <ul style="list-style-type: none"> Team di investigazione | <ul style="list-style-type: none"> Investigazione incidente | <ul style="list-style-type: none"> Documentazione dell'incidente |

Tabella 5. Descrizione delle relazioni del Gestore.

3.6. Staff della sicurezza

Lo staff della sicurezza è inteso come la funzione aziendale responsabile delle attività svolte in ambito di mantenimento delle condizioni di sicurezza dell'impianto che, se competente in materia, ha anche il compito di coadiuvare il Gestore nell'organizzare la struttura del SGS e nell'elaborare la valutazione dei rischi associati alle sostanze pericolose e adottare idonee misure tecniche e gestionali per garantire la sicurezza. In Tabella 6 sono descritte le relazioni che esistono tra lo staff della sicurezza rappresentato dal RSPP e/o servizio HSE (Health, Safety and Environment) e gli altri componenti del sistema; inoltre, sono identificate le azioni di controllo e feedback coinvolti tra gli elementi.

| Staff della sicurezza | | |
|---|---|--|
| Controllore di | Azioni di controllo imposte sulle entità controllate | Feedback inviato dalle entità controllate |
| <ul style="list-style-type: none"> Lavoratori (stabilimento) | <ul style="list-style-type: none"> Nessuna | <ul style="list-style-type: none"> Nessuno |
| Controllato da | Azioni di controllo imposte dalle entità controllori | Feedback inviato alle entità controllori |
| <ul style="list-style-type: none"> Gestore | <ul style="list-style-type: none"> Organizzazione, gestione e coordinamento Notifiche dei cambiamenti e modifiche d'impianto e sostanze | <ul style="list-style-type: none"> Valutazione dei rischi Notifica eventi (quasi incidenti, incidenti) |

Tabella 4. Descrizione delle relazioni dello staff della sicurezza

L'analisi fornisce informazioni sugli aspetti gestionali ed organizzativi e le loro interazioni. Lo staff della sicurezza svolge un ruolo fondamentale nella definizione e implementazione tecnico-operativa del sistema gestionale aziendale (non considerato ai fini di questa analisi). In particolare, la sua presenza e le sue competenze consentono di modulare le interazioni e le relazioni tra i dipendenti, adattandole alle specifiche esigenze del processo industriale considerato. Al di sotto dello staff della sicurezza si trovano tutti coloro che, a vario titolo, costituiscono l'organizzazione aziendale. Su questa base, l'analisi del presente lavoro si limita allo studio delle relazioni che esistono tra Autorità legislative e lo staff della sicurezza aziendale, ma suggerisce un'ulteriore estensione del modello STAMP aggiungendo i componenti più prettamente operativi del processo industriale desiderato.

4. Conclusioni

Questo lavoro di ricerca investiga il tema della gestione dei rischi per la prevenzione di incidenti rilevanti presso organizzazioni che utilizzano sostanze pericolose e che per questo motivo devono rispondere a quanto definito nella Direttiva Seveso III e nel d.lgs. 105/15. L'obiettivo principale di questo lavoro è di testare un modello di analisi dei processi basato sulla normativa citata, conducendo un'analisi qualitativa delle interazioni tra tutti coloro che sono coinvolti e fornendo uno strumento per la gestione della sicurezza da cui trarre un vantaggio competitivo. Sono stati rappresentati gli aspetti relativi alle ispezioni SGS-PIR svolte negli impianti (così come stabilito dal Decreto) tramite un modello di analisi in grado di individuare le possibili cause di incidenti. Il modello rimane generale, ossia applicabile a diverse tipologie di stabilimenti Seveso, al fine di fornire un modello di analisi dei rischi universale che possa integrare i vari aspetti normativi di questo settore. Il risultato consiste nella creazione di un modello sistemico che mappa tutti gli attori coinvolti a livello organizzativo nella gestione della sicurezza di una generica industria Seveso, tenendo conto dei ruoli e delle responsabilità, identificando tutte le azioni di controllo e i relativi feedback che consentono di mantenere il sistema in uno stato di rischio

minimo. Il modello evidenzia come all'interno di sistemi complessi le relazioni causa-effetto non siano lineari e come possano derivare: (i) dal mancato rafforzamento dei vincoli di sicurezza portando a violazioni e generando gravi conseguenze, o (ii) dal disallineamento tra il modello di processo degli attori coinvolti, e la realtà che porta a misure correttive errate o non efficaci. Si noti come il modello presentato rappresenti una semplificazione dell'intero processo di ispezione in ambito Seveso. Alla luce di ciò, futuri sviluppi sono necessari per dettagliare ulteriormente il modello, aggiungendo agenti tecnico-operativi, e specifiche d'impianto. Tale modello dovrà essere validato con esperti per evidenziare agenti e relazioni attualmente non mappati, fornendo una rappresentazione completa e dettagliata della direttiva Seveso.

Se da un lato questo studio fornisce, quindi, un valido supporto alle organizzazioni dal punto di vista della gestione del rischio in un contesto in cui questo tema sta diventando sempre più problematico e sfidante, dall'altro è importante anche riconoscerne i limiti. Un approccio puramente qualitativo per affrontare e gestire i rischi di incidenti rilevante non è sufficiente per garantire una risposta proattiva al problema. Si potrebbero, quindi, condurre ulteriori studi con il fine di integrare il modello con un'analisi semi-quantitativa. Ad esempio, le tecniche CAST [13] o STPA [14] potrebbero essere utilizzate per approfondire la struttura del sistema realizzato e analizzare l'efficienza e l'efficacia del flusso di informazioni all'interno del sistema, o il peso di ogni attore nella prevenzione degli incidenti.

Acknowledgement

Questo lavoro è parte del progetto di ricerca BRIC 2022 – ID02 framework Resilience Engineering for Safe Energy Transition (RE-SET).

Bibliografia

- [1] S. Dekker, P. Cilliers, and J. H. Hofmeyr, "The complexity of failure: Implications of complexity theory for safety investigations," *Saf Sci*, vol. 49, no. 6, pp. 939–945, Jul. 2011, doi: 10.1016/j.ssci.2011.01.008.
- [2] W. Elmaraghy, H. Elmaraghy, T. Tomiyama, and L. Monostori, "Complexity in engineering design and manufacturing," *CIRP Ann Manuf Technol*, vol. 61, no. 2, pp. 793–814, 2012, doi: 10.1016/j.cirp.2012.05.001.
- [3] Repubblica Italiana, "Decreto Legislativo 26 giugno 2015, n. 105. Attuazione della Direttiva 2012/18/UE relativa al controllo del pericolo di incidenti rilevanti connessi con sostanze pericolose.," 2015.
- [4] European Union, "Directive 2012/18/EU of the European Parliament and of the Council of 4 July 2012 on the control of major-accident hazards involving dangerous substances, amending and subsequently repealing Council Directive 96/82/EC," 2012.
- [5] N. Leveson, "Applying systems thinking to analyze and learn from events," *Saf Sci*, vol. 49, no. 1, pp. 55–64, Jan. 2011, doi: 10.1016/j.ssci.2009.12.021.

- [6] N. Leveson, "A new accident model for engineering safer systems," *Saf Sci*, vol. 42, no. 4, pp. 237–270, Apr. 2004, doi: 10.1016/S0925-7535(03)00047-X.
- [7] N. Leveson, *Engineering a Safer World: Systems Thinking Applied to Safety*. Cambridge: MIT Press, 2011.
- [8] N. Leveson and J. Thomas, *STPA Handbook*. 2018.
- [9] A. J. Nakhal A, R. Patriarca, M. Tronci, P. Agnello, S. M. Ansaldi, and A. Ledda, "A STAMP Model for Safety Analysis in Industrial Plants," *Chem Eng Trans*, vol. 91, 2022, doi: 10.3303/CET2291068.
- [10] S. Biswal, "CogniCAST: An extension to CAST with human cognition Causal Analysis based on STAMP View project CogniCAST An extension to CAST with human cognition," 2019, doi: 10.13140/RG.2.2.23169.07521.
- [11] UNI, "UNI 10616:2022. Stabilimenti con pericolo di incidente rilevante - Sistemi di gestione della sicurezza - Linee guida per l'applicazione della UNI 10617.," 2022.
- [12] UNI, "UNI 10617:2019. Stabilimenti con pericolo di incidente rilevante - Sistemi di gestione della sicurezza - Requisiti essenziali.," 2019.
- [13] A. J. Nakhal A, G. D. Gravio, L. Fedele, and R. Patriarca, "Learning from Incidents in Socio-Technical Systems: A Systems-Theoretic Analysis in the Railway Sector," *Infrastructures (Basel)*, vol. 7, no. 7, 2022, doi: 10.3390/infrastructures7070090.
- [14] M. Chaal, O. A. Valdez Banda, J. A. Glomsrud, S. Basnet, S. Hirdaris, and P. Kujala, "A framework to model the STPA hierarchical control structure of an autonomous ship," *Saf Sci*, vol. 132, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.ssci.2020.104939.

Studio finalizzato ad una diversificazione energetica integrata all'interno di uno stabilimento a rischio rilevante

V. Prete¹, G. Gorrino², S. Manna², A. Urso¹, I. Briasco³, P. Anesa³, A. Brossa³, N. Proietti³, G. Odino⁴

¹Inail - Uot di Alessandria

²Inail - Uot di Roma

³ICE S.p.A.

⁴Studio Ing. Odino

Abstract

La società ICE S.p.A. di Basaluzzo (AL), azienda a rischio di incidente rilevante opera nel settore chimico farmaceutico, per la produzione di principi attivi per l'industria farmaceutica. I processi per le diverse produzioni necessitano di ingenti quantità di vapore prodotto attualmente con generatori alimentati a gas metano con elevatissimi consumi di quest'ultimo, in aumento in relazione all'espansione produttiva dello stabilimento. Lo scopo degli interventi è quello di ridurre il più possibile la dipendenza dai combustibili fossili attraverso investimenti in termini di diversificazione delle fonti energetiche all'interno del sito di Basaluzzo. Le azioni previste si riassumono principalmente in 3 progetti: - produzione di vapore tramite combustione di biogas generato dal trattamento anaerobico dei reflui di scarico dello stabilimento: circa 6% di risparmio sui consumi di gas metano; - produzione di vapore tramite generatore di vapore elettrico alimentato dall'energia generata da un campo fotovoltaico 2.621 kWp: circa 12.5% di risparmio sui consumi di gas metano; - produzione di vapore tramite generatore di vapore alimentato a biomassa della potenzialità di 2.4 MW alimentata da combustibile solido: circa 20% di risparmio sui consumi di combustibile gas metano. Ciascuno di questi progetti verrà integrato in un unico sistema interconnesso e automatizzato di gestione della produzione di vapore che, a seconda delle richieste del processo produttivo ed in funzione della disponibilità e qualità delle diverse fonti energetiche, privilegerà l'uso di fonti rinnovabili. Il presente studio vuole costituire uno spunto di riflessione anche per altre aziende che abbiano come obiettivo di intraprendere la strada della transizione energetica.

Keywords: diversificazione energetica, fonti rinnovabili, consumi.

1. Introduzione

I processi necessari per le diverse produzioni dell'azienda chimico farmaceutica oggetto della memoria utilizzano ingenti quantità di vapore prodotto attualmente con generatori alimentati a gas metano con conseguenti elevatissimi consumi di

quest'ultimo in aumento anche in relazione all'espansione produttiva dello stabilimento.

Attualmente i reflui sono inviati a trattamenti consortili esterni senza alcun recupero energetico e con un grosso carico di inquinante organico.

Dei vari progetti ipotizzati ad oggi è stato realizzato solo il primo consistente nella produzione di vapore tramite combustione di biogas prodotto dalla digestione anaerobica dei reflui.

Tale progetto di diversificazione energetica nasce dalla possibilità di convertire il carico organico inquinante dei reflui di processo tramite l'azione di batteri anaerobi in biogas, come fonte energetica di recupero utilizzata in sostituzione del combustibile fossile.

L'impianto realizzato consente pertanto di abbassare il carico inquinante verso l'esterno e di recuperare energia per la produzione del vapore impiegato nei processi produttivi come fluido riscaldante dei reattori.

All'interno dell'impianto di depurazione avvengono anche i seguenti processi di recupero energetico:

- Il refluo in ingresso al reattore anaerobico viene preriscaldato recuperando calore dall'uscita del reattore stesso tramite uno scambiatore di calore;
- Il ricircolo del reattore anaerobico viene mantenuto alla temperatura di 35°C, ottimale per la vita dei batteri anaerobici, tramite scambio termico con l'acqua di raffreddamento dell'impianto di cogenerazione.

Un ulteriore sviluppo dell'impianto di depurazione potrebbe consentire la realizzazione di un ciclo chiuso di riutilizzo dell'acqua all'interno del processo produttivo limitandone l'emungimento da falda sotterranea.

Tale sviluppo consisterebbe nell'eliminazione di un ulteriore ultimo inquinante, rimasto nelle acque dopo il trattamento biologico, ovvero la concentrazione salina, tramite l'ausilio di processi di ultrafiltrazione associati ad evaporatori a duplice o triplice effetto.

2. Impianto di depurazione e produzione di biogas

Il primo progetto realizzato è quello di trattamento degli effluenti interni dello stabilimento tramite processo biologico.



Figura 1. Layout 3D dell'impianto

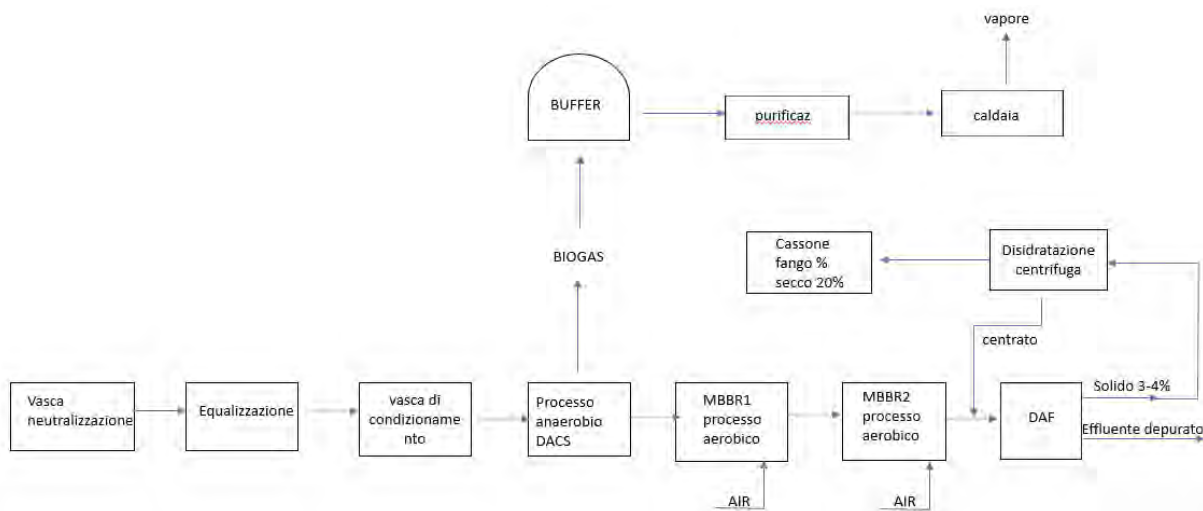


Figura 2. Schema a blocchi semplificato del processo di trattamento biologico

L'impianto di trattamento reflui interno verrà alimentato dalla esistente vasca di equalizzazione e omogeneizzazione presente in stabilimento.

A progetto, la portata media è di 30 m³/h e la concentrazione di COD (Chemical Oxygen Demand) è pari a 8000 mg/l.

L'impianto raccoglie tutti i reflui provenienti dallo stabilimento in una nuova vasca di equalizzazione, al fine di limitare le fluttuazioni di carico idraulico e di concentrazione che possano sfuggire al sistema preesistente di fabbrica.

All'interno della vasca di equalizzazione vengono dosati micronutrienti, urea e acido fosforico in quantità tali da ottenere un giusto equilibrio e valore di pH necessari all'ottenimento di un ottimale sviluppo della flora batterica presente nei reattori anaerobici e aerobici dell'impianto di trattamento.

Dopo l'equalizzazione il refluo viene inviato alla vasca di condizionamento.

Al fine di ottenere il pH ottimale richiesto dai microrganismi presenti nelle fasi successive del trattamento viene immessa soda caustica. Questa unità riceve inoltre una corrente di ricircolo proveniente dal digestore anaerobico, ricca di anidride carbonica e bicarbonati. Nella vasca di condizionamento, si libera quindi anidride carbonica riducendo l'acidità del sistema con conseguente riduzione della richiesta di soda caustica.

Il refluo in uscita dalla vasca di condizionamento si divide in due correnti:

- Una parte viene inviata in uno scambiatore a piastre che utilizza come fluido riscaldante l'acqua calda di recupero proveniente dall'unità di cogenerazione al fine di ottenere la temperatura del refluo richiesta alla vasca di condizionamento, e quindi al digestore anaerobico, che costituisce l'unità successiva.
- Una parte viene inviata al digestore anaerobico (DACs) alla temperatura idonea per il suo corretto funzionamento.

2.1 La tecnologia DACS (Downflow - Anaerobic - Carrier - System),

L'innovativa tecnologia di depurazione adottata, denominata DACS è caratterizzata da ridotte dimensioni dell'impianto, dal contenimento degli odori e da ridotti costi

operativi.

Detta tecnologia permette di produrre biogas come fonte di energia dal carico organico, evitando di utilizzare una quantità significativa di energia per convertire questi componenti in CO_2 e fanghi destinati allo smaltimento.

A tale scopo risulta fondamentale l'utilizzo di "carriers" con elevata superficie interna, i quali agiscono come una sorta di "casa" galleggiante per i batteri anaerobici.

Il sistema è molto flessibile nell'adattarsi alle dimensioni e alla configurazione specifiche del serbatoio ed utilizzando il principio del flusso in controcorrente non necessita costosi separatori a tre fasi.



Figura 3. Serbatoio DACS



Figura 4. "carriers" con e senza batteri anaerobici

Le acque reflue sono immesse nel reattore anaerobico (DACs) dopo una prima fase di equalizzazione ed omogenizzazione, entrano dall'alto del reattore, appena sotto il "tetto", e scorrono verso il basso attraverso il letto di carriers fino all'uscita dell'effluente depurato sul fondo del reattore.

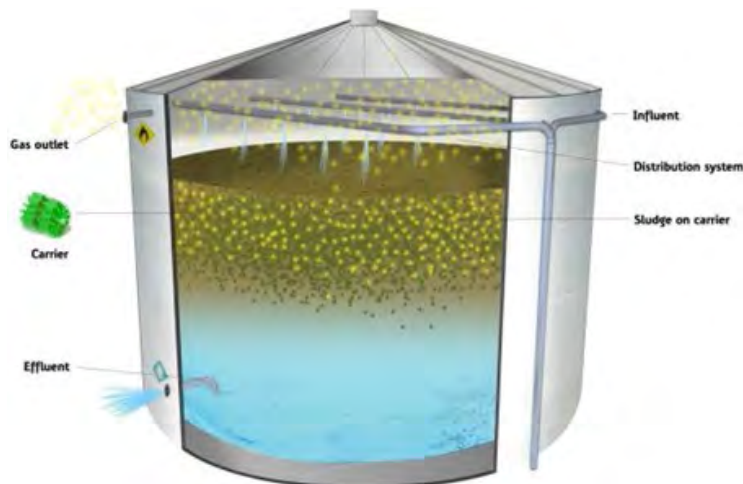


Figura 5. Schema Serbatoio DACS

I carriers sono piccoli supporti inerti aventi un'elevata superficie specifica ($650 \text{ m}^2/\text{m}^3$) sulla quale si forma il biofilm microbico che rappresenta l'elemento fondamentale per la rimozione degli inquinanti.

Durante il processo di trattamento i supporti "galleggianti" a cui è adesa la biomassa si muovono verso l'alto, in direzione controcorrente, insieme al biogas prodotto che viene raccolto sotto il "tetto", mentre le acque reflue depurate per circa il 70% del loro carico, escono dal compartimento anaerobico attraverso un tubo di scarico posto nella parte inferiore del reattore verso il trattamento aerobico (MBBR).

Questo processo biologico avviene in condizioni anossiche in quanto i batteri atti alla rimozione del substrato sono anaerobi: essi convertono parte del substrato carbonioso presente nel refluo (70% di rimozione del COD in ingresso) in biogas, una miscela gassosa costituita principalmente da metano (70-80%), anidride carbonica (20-29%) e tracce di solfuro d'idrogeno.

Il biogas prodotto (circa $60 \text{ Nm}^3/\text{h}$) viene previamente stoccato in un accumulatore pressostatico (biogas buffer) ed in seguito inviato ad un'apposita sezione di purificazione costituita da un bio-scrubber, un deumidificatore e una sezione a carboni attivi, al fine di eliminare le impurezze.

2.2. Biogas Buffer

Il biogas buffer (50 m^3) assorbe i picchi di produzione per garantire un funzionamento regolare del generatore di vapore e della torcia di emergenza. Il biogas fluirà, a pressione controllata, al trattamento del biogas prima di alimentare il generatore di vapore o, in circostanze di emergenza, durante operazioni di manutenzione del generatore di vapore e in caso di attività ridotta dell'impianto, alla torcia di emergenza.



Figura 6. Torcia

| | | |
|----|-----------------------------|---------------------------------|
| 01 | Valvola intercettazione | Shut-off valve |
| 02 | Linea principale gas | Main gas train |
| 03 | Elemento rompi-fiamma | Flame arrester |
| 04 | Schermo antivento | Windshield |
| 05 | Elettrodo accensione | Ignition electrode |
| 06 | Sonda UV (controllo fiamma) | UV sensor (flame monitoring) |
| 07 | Quadro controllo | Control cabinet |
| 08 | Linea pilota | Pilot line |
| 09 | Soffiante (opzionale) | Gas blower / booster (optional) |

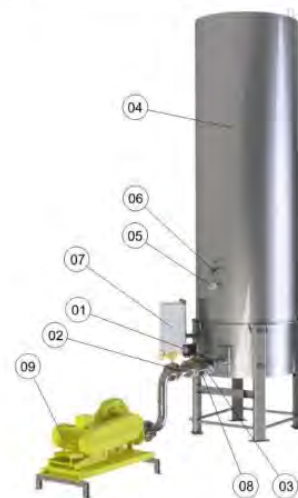


Figura 7. Schema Torcia

La torcia è a fiamma completamente non visibile e si avvia in automatico al raggiungimento di un set point di allarme del livello del biogas buffer.



Figura 8. Biogas buffer

2.3. Purificazione del biogas e filtri a carboni attivi

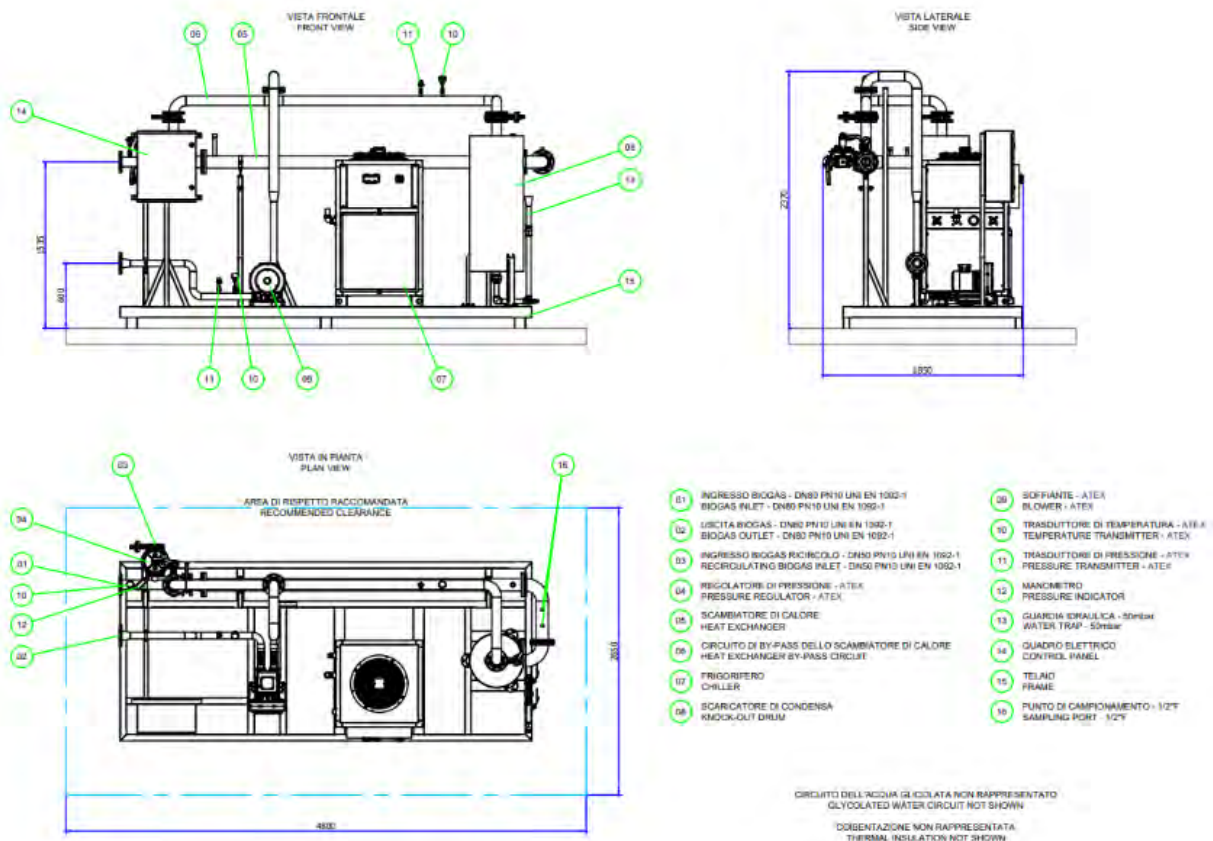


Figura 9. Impianto di purificazione

Il biogas prodotto nel reattore anaerobico (DACS) contiene metano, CO₂ e altre impurezze principalmente consistenti in solfuro di idrogeno (H₂S). Per questo motivo, prima di essere utilizzato, il biogas deve essere purificato: in particolare deve essere deumidificato e deve essere rimosso il solfuro di idrogeno.

Il sistema di purificazione è composto da:

- Scambiatore di calore a fascio tubiero
- Filtro combinato di aspirazione
- Chiller
- Circuito integrato di acqua refrigerata
- Compressore del biogas
- Due filtri a carbone attivo in parallelo

La concentrazione tipica di H_2S nel biogas all'uscita dell'unità di purificazione a carboni attivi è generalmente inferiore a 50 ppm, in funzione del carico di H_2S .

Il sistema di deumidificazione scarica la condensa in un pozzetto in cui il livello viene mantenuto da una pompa. L'eventuale reintegro di acqua potabile funge anche da guardia idraulica per la linea di distribuzione biogas.



Figura 10. Impianto di purificazione

3. Utilizzo del biogas per produzione di vapore

3.1 Generatore di vapore

Dopo la fase di purificazione (essiccazione e rimozione H_2S), il biogas è utilizzato in un generatore di vapore dedicato al biogas caratterizzato da una potenzialità di 488 kW.



Figura 11. Generatore di vapore

Il generatore di vapore regola il proprio funzionamento in funzione del mantenimento di un livello costante all'interno del buffer biogas, andando a modificare il carico del bruciatore in funzione del flusso di biogas prodotto e accumulato all'interno del buffer.

4. Trattamento aerobico

Il refluo in uscita dal fondo del reattore anaerobico viene inviato inizialmente in un Riser, un'unità che permette di controllare il profilo idraulico presente all'interno del DACS, inviando parte del refluo a monte della vasca di condizionamento.

Un'altra funzione del riser consiste nel rilasciare parte degli off-gas generati dal processo. Gli off-gas vengono collettati in un'unica linea e inviati al sistema interno di trattamento di (postcombustore) o al sistema di back up interno al depuratore (ossidazione come aria falsa nei reattori aerobici).

Il refluo viene convogliato in una ulteriore sezione di purificazione biologica costituita da due reattori disposti in serie.

Questi due reattori al cui interno è presente un letto di carriers responsabile dello sviluppo del biofilm presentano una configurazione MBBR (Moving Bed Bio Reactor). Il processo depurativo avviene tramite un processo microbico aerobico, i reattori vengono aerati costantemente al fine di mantenere un'idonea concentrazione di ossigeno disciolto nel refluo necessaria allo sviluppo e alla crescita dei microrganismi. Grazie all'aerazione, i carriers si ritrovano in continuo movimento nel refluo creando così la configurazione "a letto mobile". Questa sezione biologica permette la possibilità di dosare prodotti antischiuma nel caso di sbilanciamento del processo con formazione di schiume.

Il refluo, depurato, in uscita dal processo biologico viene inviato al DAF (Dissolved Air Flotation) questa unità ha lo scopo di chiarificare il refluo separando la parte solida dal refluo depurato.

Per questa operazione, all'interno del DAF viene dosato un polielettrolita (reagente chimico avente la funzione di flocculante) i flocculanti di fango formati risalendo in superficie, grazie all'inserzione di aria compressa, permettono la separazione della parte solida dall'effluente chiarificato.

In uscita al DAF vi sono due correnti principali:

- L'effluente chiarificato e depurato, con concentrazione di COD inferiore a 500 mg/l, che verrà inviato ai rispettivi depuratori pubblici.
- L'effluente concentrato di fango, con percentuale di sostanza secca pari al 3% che viene inviato alla sezione di trattamento fanghi.

Nella sezione trattamento fanghi avviene la disidratazione e la stabilizzazione del fango. Il fango viene inviato alla centrifuga che permette la separazione della sostanza secca dalla sostanza liquida si avrà una corrente solida avente il 15-20% di sostanza secca che viene inviata al container di raccolta e un una corrente liquida che

viene inviata a monte del DAF. I fanghi vengono raccolti in un apposito container a chiusura non ermetica costituita da un, telone.

Questa sezione prevede un serbatoio di raccolta fanghi che permette la raccolta del fango durante le ore di non funzionamento della centrifuga

Il refluo risulta completamente depurato con un'efficienza di rimozione superiore al 90% del carico organico.

L'impianto riceve un refluo avente 7000 mg/l di COD, dopo il DACS il refluo in uscita ha una concentrazione ridotta pari a circa 1700-2000 mg/l di COD e in fine in uscita al MBBR, dopo la separazione dal fango, la concentrazione nell'effluente finale è inferiore a 500 mg/l di COD.

Il fango sperato dal DAF verrà poi ulteriormente essiccato ed inviato a smaltimento.

5. Conclusioni

Con questo sistema l'impianto riesce a trattare circa 200.000 m³/anno di refluo abbattendo il COD da 8000 g/m³ a 500 g/m³ con un'efficienza di abbattimento maggiore del 90%.

In questo modo si produrranno 70 Nm³/h di biogas con la conseguente generazione di circa 580 kg/h di vapore che costituiscono il 6-7% dell'attuale fabbisogno annuo di vapore. In questo modo si ha una riduzione di consumo annuo di metano del 6%.

Un ulteriore spunto di sviluppo futuro del progetto potrebbe essere la possibilità di essiccare ulteriormente il fango prodotto e produrre dei pellet aventi ancora contenuto energetico recuperabile.

La Ditta sta realizzando un proprio piano pluriennale di riduzione delle emissioni di CO₂, che verrà usato come road map per i prossimi investimenti futuri in termini di consumi energetici, in base all'esito di questa valutazione verranno definiti i prossimi interventi.

Bibliografia

[1] Manuali d'uso e manutenzione delle attrezzature installate

[2] M. Hans, S. Kumar. Biohythane production in two-stage anaerobic digestion system. 2018.

[3] Giuseppe Campo. Pretrattamenti finalizzati all'ottimizzazione della digestione anaerobica dei fanghi di depurazione. Politecnico di Torino. 2013.

[4] P. Khongkliang, P. Kongjan, S. O-Thong. Hydrogen and Methane Production from Starch Processing Wastewater by Thermophilic Two-Stage Anaerobic Digestion. 2015.

[5] P. Cozma, W. Wukovits, I. Mămăligă, A. Friedl, M. Gavrilăscu. Analysis and Modelling of the Solubility of Biogas Components in Water for Physical Absorption Processes. *Environmental Engineering and Management Journal*. 2013;12(1):147-62.

Curve di danneggiamento di SSC in ambito RIR: applicazione della teoria della dinamica aleatoria

N. Mordà¹, C. De Simone²

¹INCOSER srl Torino

²Studio Professionale DE SIMONE Torino

Abstract

Il comparto industriale – e specificamente quello degli stabilimenti a rischio incidente rilevante “RIR” (classificati in Italia di soglia inferiore (SI) o superiore (SS)¹ in base al D.Lgs.105/2015, di recepimento della Direttiva 2012/18/UE) – sembra spesso basare l’analisi di rischio sismico su un approccio civile mutuato dalla “mera” applicazione delle formulazioni delle Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC) dedicate marcatamente ai fabbricati. In una più corretta ottica di approccio di progettazione sismica *Risk Based*, presentata dagli autori nell’edizione SAFAP 2016, diventa indispensabile avere a disposizione uno strumento tecnicamente affidabile ed efficiente per costruire le funzioni di danneggiamento specifiche per Sistemi, Strutture e Componenti (nel seguito SSC) - e non già per classi omologhe – da poter utilizzare nell’Analisi Quantitativa di Rischio Sismico (QRSA) e nelle relative “correlazioni di flusso logico” che collochino correttamente il potenziale

¹ Da questa suddivisione possono derivare differenti obblighi come, ad esempio, per gli stabilimenti di soglia superiore, la redazione del Rapporto di Sicurezza o la predisposizione del Piano di Emergenza Interna (PEI).

Per entrambe le tipologie di stabilimento è prevista la predisposizione di un Piano di Emergenza Esterno (PEE) redatto dalla Prefettura territorialmente competente e l’effettuazione dei controlli in impianto (verifiche ispettive).

Le ispezioni degli stabilimenti RIR sono svolte al fine di consentire un esame pianificato e sistematico dei sistemi tecnici, organizzativi ed di gestione applicati nello stabilimento e sono pianificate, programmate ed effettuate sulla base di criteri e modalità definiti. Per gli stabilimenti SS il piano delle ispezioni viene predisposto a livello nazionale dal Ministero dell’Interno in collaborazione con ISPRA e quindi declinato dal CTR; le Regioni predispongono piani regionali riguardanti tutti gli stabilimenti di soglia inferiore siti nell’ambito dei rispettivi territori.

L’art.11 del D.Lgs. 26/06/2015, n.105 prevede infine il “Coordinamento per l’uniforme applicazione sul territorio nazionale”, istituito presso il Ministero dell’Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare (MATTM) e composto da rappresentanti del MATTM, del Dipartimento di protezione civile presso la Presidenza del Consiglio dei Ministri, del Ministero dell’interno, delle infrastrutture e trasporti, dello sviluppo economico, della salute, delle regioni e province autonome, dell’Associazione nazionale comuni d’Italia (ANCI). Partecipano, inoltre, al Coordinamento rappresentanti del Corpo nazionale dei vigili del fuoco, dell’INAIL, dell’Istituto superiore di sanità nonché, in rappresentanza del Sistema nazionale per la protezione ambientale, esperti dell’ISPRA e, su indicazione della regione o provincia autonoma di appartenenza, delle agenzie regionali e provinciali per la protezione dell’ambiente.

danneggiamento da sisma all'interno della Valutazione del Rischio (VdR) aziendale e degli effettivi scenari propri dello specifico processo produttivo.

Ciò consente di calibrare la nuova progettazione (o la verifica di vulnerabilità, nel caso di stabilimenti esistenti) nell'ambito del rispetto dei requisiti di capacità sismica che l'analisi di rischio impone, potendo differenziare in modo specifico i vari SSC in relazione alla "rilevanza di processo", con intuibili vantaggi pratici, operativi ed ispettivi.

Il punto cruciale dell'analisi è la definizione della specifica curva di danneggiamento con riferimento a specifici stati di danno che, benché trattata ampiamente nella letteratura specialistica, è affrontata con riferimento a massive analisi *time-history* (non lineari) che portano ad un'onerosità procedurale perseguibile solo in ambito di ricerca. In ambito tecnico-operativo, invece, sarebbe auspicabile disporre di una procedura più agile, ma altrettanto accurata e necessariamente conforme alle NTC vigenti, con chiara e coerente esplicitazione della descrizione di base dell'azione sismica (spettro elastico e parametri di pericolosità sismica).

La memoria propone, nelle sue linee teoriche, una procedura pratica dedicata alla costruzione di tali curve basata sulla teoria delle vibrazioni random delle strutture (RVT), che rappresenta un approccio duale del problema sismico ed oramai consolidata da molti decenni. La RVT presenta un notevole sviluppo matematico iniziale che, una volta esperito, costituisce una base diretta e speditiva per tutti i calcoli di natura probabilistica insiti nell'analisi QRSA.

Il caso di studio è rappresentato dai serbatoi sferici che, nonostante la loro semplicità di forma, presentano una serie di peculiarità ed una scarsa contestualizzazione normativa: ciò che li rende particolarmente interessanti sul piano della ricerca applicata.

Keywords: rischio sismico, analisi di rischio, QRSA.

1 Analisi sismica aleatoria delle strutture

L'Eurocodice 8 (EC8) [1] statuisce che *"La natura aleatoria degli eventi sismici e la limitatezza dei mezzi disponibili per valutarne gli effetti sono tali per cui il raggiungimento di tali scopi sia possibile solo in maniera parziale e misurabile solo in termini probabilistici. Il grado di protezione che può essere applicato alle diverse categorie di edifici, misurabile solamente in termini probabilistici."* Ciò è ancora più vero in contesti in cui l'Analisi Quantitativa di Rischio è l'approccio progettuale ordinario ed è questo il caso degli stabilimenti RIR nei quali la misura diretta della probabilità di default di strutture, sistemi o componenti (SSC) diventa la modalità di verifica riferimento. Difatti le verifiche in tale ambiente antropico sono basate sulle probabilità di accadimento di alcuni eventi come imposto dal DM 9/5/2001 [2], [9] che definisce delle specifiche probabilità di evento. In questa analisi il sisma si colloca naturalmente stante la definizione dell'EC8 e deve essere temperato in termini di effetti probabilistici su SSC nell'ambito del processo di Valutazione Quantitativa di Rischio [4]. L'analisi

probabilistica degli effetti sismici può essere condotta con approccio diretto – ossia con una serie di time-history lineari e non lineari (LTH e NLTH) basate su accelerogrammi spettro-compatibili – ovvero tramite l’approccio della Dinamica Aleatoria (RVT) che si basa sulla caratterizzazione del processo aleatorio “evento sismico” tramite la Densità Spettrale di Potenza (PSD) che rappresenta il duale dello spettro di risposta.

Entrambi gli approcci, se correttamente utilizzati, conseguono il risultato atteso. La differenza sta eminentemente nello “sforzo computazionale” richiesto dalle NLTH, dato dall’onerosità dell’analisi-oltre la soglia di azione sismica, a partire dalla quale il comportamento strutturale evolve in campo plastico [3].

L’analisi aleatoria (RVT) – ormai consolidata da decenni di utilizzo in un’ampia serie di applicazioni – costituisce uno strumento più agile che consente di rappresentare statisticamente il moto sismico al suolo e di calcolare il valore di picco atteso.

In pratica, la RVT può essere collocata in un quadro teorico che mette in relazione il contenuto di frequenza e la durata del moto con la distribuzione probabilistica del picco massimo della risposta [5]. Da ciò si intuisce come, da un punto di vista operativo, tale apparato teorico sia di grande interesse per l’ingegnere che deve necessariamente trattare le variabili di controllo del sistema meccanico soggetto all’azione sismica tramite le probabilità di superamento di certe soglie che definiscono specifici stati di danno (*Damage States, DS*), lasciando, eventualmente, alle NLTH il ruolo di controllo finale della progettazione [3]. Anche al RVT non è scevra da onerosità: essa è incardinata sulla PSD che, per coerenza normativa, deve derivare dallo spettro di risposta (RS) previsto delle norme tecniche per le costruzioni (2018). Il passaggio diretto da PSD a RS è un calcolo semplice ma il passaggio da RS a PSD comporterebbe la soluzione di una equazione integrale; per la definizione della probabilità di superamento di una fissata barriera della risposta occorrerebbe poi calcolare una serie di integrali aggiuntivi decisamente articolati [3]. Inoltre, i sistemi non lineari non sono direttamente contemplati nella RVT: ciò implica il “pre-trattamento” con l’utilizzo delle tecniche di linearizzazione statistica [6]. Tuttavia, l’evoluzione della RVT ha prodotto delle espressioni di corrente utilizzo che consentono di superare tali difficoltà in modo pratico e diretto, senza incorrere in eccessivo onere computazionale rispetto alla pratica professionale. Per le strutture con comportamento meccanico non lineare, in alternativa alla definizione dello spettro di progetto tramite il fattore di comportamento q (che nell’ambito dei serbatoi sferici è affatto normato) viene proposta in questo studio la definizione di sistema lineare equivalente sviluppata da *Lin et al* [7], accolta con notevole interesse in ambito scientifico, date le problematiche evidenziate dal metodo q - μ -T recepito dalle NTC, e che si rivela di utile apporto pratico. Tale formulazione (non iterativa) utilizza direttamente curva di capacità e rapporto, R , tra la domanda elastica dell’oscillatore elementare e la sua soglia plastica, portando alla definizione di un oscillatore lineare equivalente che consente quindi di applicare le espressioni analitiche di passaggio da RS a PSD prodotte in forma chiusa da *Barone et al* [7].

Superati questi aspetti computazionali è dunque possibile calcolare il fattore di picco della risposta \mathbf{X}_p e la probabilità \mathbf{P}_f che esso superi una certa barriera $\mathbf{b} = \mathbf{X}_{\max}$ ossia, $\mathbf{P}_f = 1 - \mathbf{P}(\mathbf{X}_p \leq \mathbf{b})$ con le formulazioni teoriche di comprovata validità espresse in [8] adatte al contesto tecnico-operativo dell'analisi di rischio.

Resta sempre un elemento di attenzione per tutti il fatto che gli attuali spettri delle NTC non contemplano alcuni effetti specifici nel caso di zone epicentrali [9]; pertanto, se occorre investire risorse computazionali massive (NLTH), è utile che esse siano dislocate per verifica di una progettazione conforme alle NTC ma con parametri descrittivi del moto sismico che tengano debitamente in conto gli aspetti appena tratteggiati. Il successivo paragrafo tratta la tematica principale dello studio.

2 Analisi di rischio sismico di un sistema meccanico

2.1 Caratterizzazione statistica del processo sismico

La caratterizzazione del processo sismico sul piano statistico si sviluppa considerando l'evento come un processo Gaussiano stazionario come da prassi. La PSD è il dato di interesse per la sua caratterizzazione statistica. Per le finalità dello studio si considera un oscillatore elementare, caratterizzato dai noti parametri: periodo proprio elastico \mathbf{T}_0 e pulsazione ω_0 , massa e rigidità \mathbf{m} e \mathbf{k} , smorzamento ξ , soglia elastica \mathbf{f}_y , spostamento massimo \mathbf{d}_u . Per esso si determinano la risposta massima e la probabilità di non superamento di una certa barriera \mathbf{b} . Si da per nota la PSD $\mathbf{G} = \mathbf{G}(\omega)$ del processo aleatorio evento sismico che è assunta come derivata dallo spettro elastico fornito dalle NTC in quanto strumento legislativo cogente. La forma di tale funzione è la seguente:

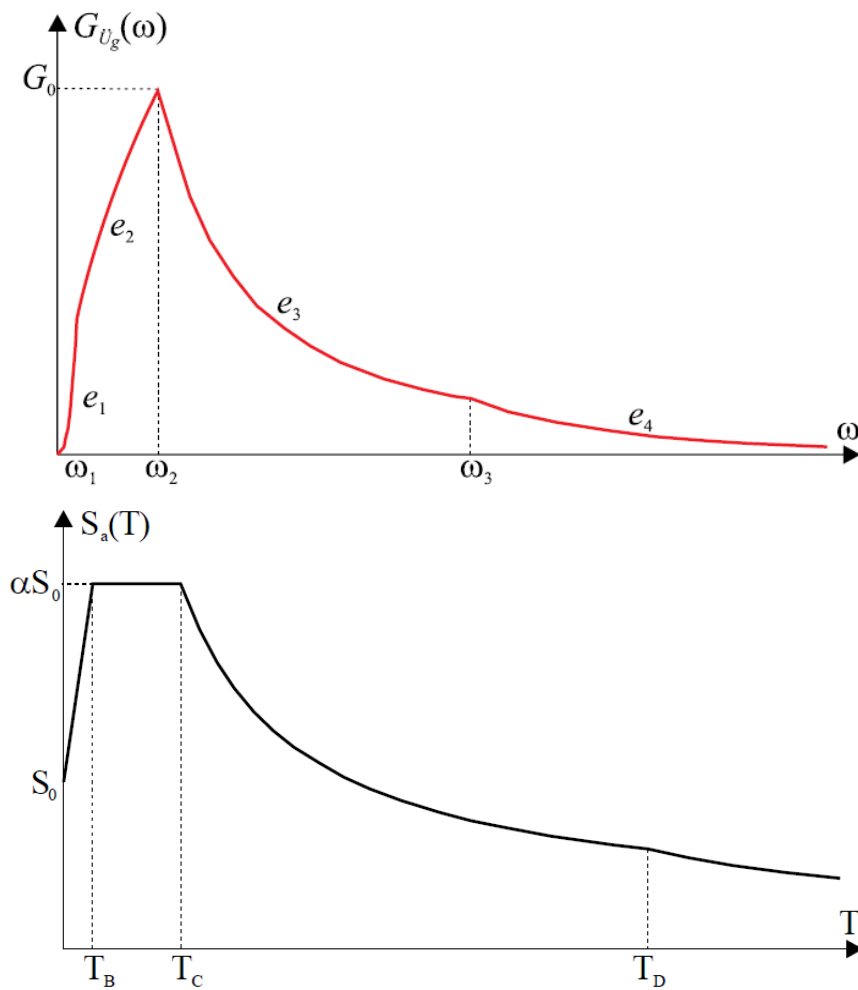


Figura 1. a) Grafico della PSD (in alto) coerente con lo spettro delle NTC; b) spettro NTC (in basso)

I valori delle pulsazioni ω_k sono determinati con la nota relazione: $\omega_k = 2\pi/T_k$; la corrispondenza con i periodi caratteristici dello spettro è definita alle precedenti figure (i.e. $T_B \sim \omega_1$ e analoghe).

L'espressione analitica di $G(\omega)^2$ è riportata di seguito:

²Nelle espressioni analitiche del testo si userà la notazione $G(\omega)$ intendendo la funzione della fig. 1sup.

$$G_u := \begin{cases} G_0 \left(\frac{\omega_1}{\omega_2} \right)^{e_2} \left(\frac{\omega}{\omega_1} \right)^{e_1} & 0 \leq \omega \text{ and } \omega < \omega_1 \\ G_0 \left(\frac{\omega}{\omega_2} \right)^{e_2} & \omega_1 \leq \omega \text{ and } \omega < \omega_2 \\ G_0 \left(\frac{\omega}{\omega_2} \right)^{e_3} & \omega_2 \leq \omega \text{ and } \omega < \omega_3 \\ G_0 \left(\frac{\omega_3}{\omega_2} \right)^{e_3} \left(\frac{\omega}{\omega_3} \right)^{e_4} & \omega_3 \leq \omega \end{cases}$$

$$\text{con: } G_0 := \frac{r \alpha^2 S_0^2}{\eta_u^2 \omega_2}$$

I parametri α ed S_0 rappresentano il fattore di amplificazione dello spettro $\alpha = F_0$ e l'accelerazione di ancoraggio dello spettro $S_0 = a_g * S$.

Gli esponenti invece $\{e_k\}$ sono forniti nella letteratura specializzata e dipendono dai successivi parametri:

$$\eta_u := \sqrt{2} \sqrt{\ln(2N_u) \left(1 - e^{-q_u^{1.2} \sqrt{\pi \ln(2N_u)}} \right)}$$

$$v_u := \frac{1}{2} \frac{\sqrt{\frac{\lambda_2}{\lambda_0}}}{\pi}$$

$$N_u := -\frac{1}{2} \frac{T_s \sqrt{\frac{\lambda_2}{\lambda_0}}}{\pi \ln(p)}$$

in cui:

λ_k = rappresenta il k -esimo momento spettrale della PSD;

p = probabilità del parametro della risposta; per $p=0.5$ si ha la mediana della risposta che è il dato d'interesse.

I calcoli che derivano sono articolati, ma sviluppati una volta per tutte diventano quindi di pratico utilizzo.

Con tale approccio è possibile costruire la PSD del processo aleatorio sismico coerente con lo spettro di risposta prescritto dalle vigenti norme tecniche, e per completezza per altre forme spettrali. Pertanto, la caratterizzazione del processo aleatorio è completa con la definizione della sua PSD.

2.2 Oscillatore elastico lineare equivalente al sistema elasto-plastico

Come detto in precedenza, la RVT non si presta ad essere utilizzata direttamente nel caso di sistemi non lineari. Dato che l'evento sismico severo risulta forzatamente

portare il sistema SSC verso la risposta in tale ambito, occorre quindi “recuperare” la linearità del sistema per beneficiare dell’applicazione della teoria aleatoria. In questa sede la proposta di studio applicativo è quella di sostituire il sistema non lineare reale con un sistema elastico-lineare “equivalente”. L’idea non è di certo nuova [7], ma il metodo scelto – di recente proposto da *Lin et al* [7] – porta con sé una serie di risvolti di sicuro interesse pratico, dato che il metodo “tradizionale” necessita della definizione della domanda di duttilità per poter linearizzare l’oscillatore, introducendo degli spettri sovrasmorzati; non essendo detta domanda di duttilità nota a priori, ciò porterebbe necessariamente ad un processo iterativo piuttosto dispendioso, cosa evitata con tale approccio.

Il metodo che evita anche l’uso dell’approccio $q-\mu-T$, fornisce delle indicazioni dirette per contemplare la variazione di periodo proprio dell’oscillatore elasto-plastico (perfetto) T_{eff} e del relativo smorzamento ξ_{eff} in relazione al fattore di riduzione della resistenza R (i.e. identico a q).

Il metodo si basa sulle seguenti equazioni:

| | |
|--|---|
| $\frac{T_{eff}}{T_0} = 1 + \frac{A}{T_0^m} (R^k - 1)$ | T_{eff} è il periodo proprio “efficace” del sistema NL T_0 è il periodo proprio del sistema lineare base |
| $\xi_{eff} = \xi_0 + \frac{B}{T_0^n} (R - 1)$ | ξ_{eff} è lo smorzamento efficace che aumenta quello proprio iniziale (5%) ξ_0 |
| $R = \frac{S_{ae}(T_0)}{a_y}$ | Fattore di riduzione della resistenza, analogo a q . $S_{ae}(T_0)$ è l’accelerazione spettrale per il sito in esame valutata sullo spettro elastico; $a_y = f_y/m$. |
| $B = 1 - \frac{aT_{eff}^r}{(1 + T_{eff})^s}$ $a = k_1 + k_2 \ln(\xi_{eff})$ | Fattore di modificazione dello spettro con smorzamento ξ_0 , che tiene conto dell’effetto delle nonlinearità meccanica del sistema e porta dallo spettro elastico a quello sovrasmorzato. |
| $S_{d,nl}^* = S_{de}(T_{eff}, \xi_0) * B(T_{eff}, \xi_{eff})$ | Spettro in spostamento che tiene conto del comportamento NL dell’oscillatore. |

Da qualche anno, nella letteratura tecnica specializzata, sulle espressioni $q-\mu-T$ emergono delle riserve di accuratezza del risultato in talune situazioni. Anche se dette espressioni vengono espressamente riportate all’interno delle NTC e relativa circolare applicativa (2019) data la responsabilità personale assunta dal professionista tecnico, è bene avere cognizione della tematica evidenziata dalla ricerca al fine di poter valutare delle alternative che – qualora più cautelative – possano essere adottate e solidamente supportate. Il metodo di *Lin* è considerato in letteratura più accurato nelle finalità che persegue (*Michel et al* 2017, *Diana et al* 2021).

Il fattore di riduzione della resistenza R è ottenuto una volta nota la soglia di plasticizzazione f_y del sistema e pertanto non occorre istituire alcuna iterazione, essendo esso un dato direttamente calcolabile.

2.3 Valutazione degli stati di danno DSK

Per le valutazioni di rischio occorre definire delle soglie del parametro caratterizzante la risposta strutturale (es. spostamento), che competono agli stati di evoluzione del danneggiamento: dai livelli più bassi, a quelli di maggior severità, sino al collasso. Ognuno di questi stati dovrà essere descritto, in termini di probabilità di superamento, da una forma matematica che dipende dal parametro di scuotimento scelto (tipicamente la massima accelerazione del suolo indotta dal sisma, *Peak Ground Acceleration* "PGA"). Tali stati di danno rappresentano le barriere $\pm b_k$ che fissano le soglie di funzionamento del sistema.

Gli stati di danno sono usualmente associati a punti specifici della curva di capacità; nel caso di serbatoi sferici *Moschonas et al.* (2014) propongono le seguenti definizioni:

| Damage State | Threshold value δ_{DSi} |
|-----------------------------|--|
| DS1: Minor/Slight Damage | $> 0.9 \cdot \delta_y$ |
| DS2: Moderate Damage | $> \delta_y + (1/3) \cdot (\delta_u - \delta_y)$ |
| DS3: Major/Extensive Damage | $> \delta_y + (2/3) \cdot (\delta_u - \delta_y)$ |
| DS4: Failure/Collapse | $> \delta_u$ |

Tabella 1. Definizioni degli stati di danno secondo Moschonas et al (2014)

I punti caratteristici delle definizioni della tabella precedente sono tracciati per i due sistemi di controventamento (a telaio o con controventi) sulle rispettive curve di capacità qualitative:

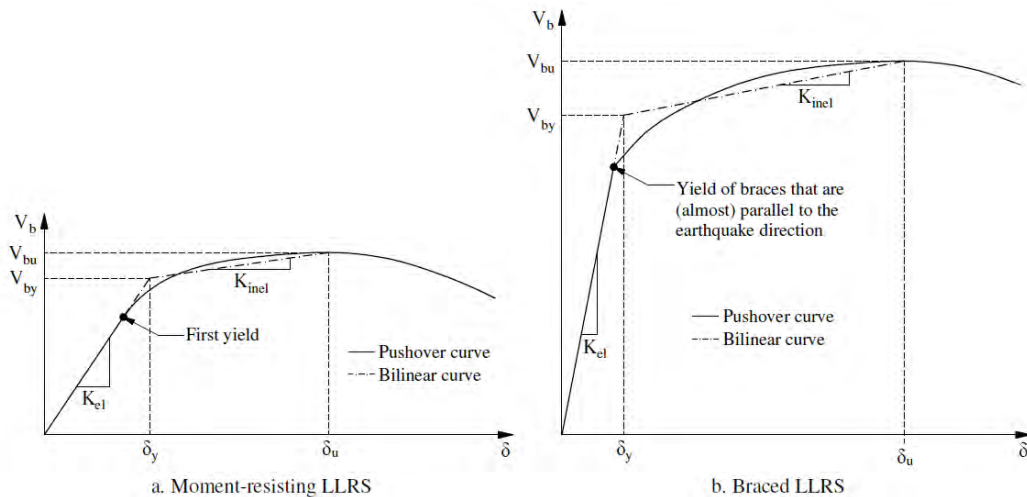


Figura 2. Definizione dei DS secondo Moschonas et al (2014)

Il parametro di risposta è lo spostamento laterale del sistema e le soglie sono definite in funzione del limite elastico (δ_y) e ultimo (δ_u) della curva di capacità linearizzata. Nulla vieta, a seconda di casi specifici, di definire delle soglie differenti; dipende dall'esigenza e dal contesto in cui il serbatoio è collocato, per cui considerazioni più specifiche possono portare a differenti soglie. Per il resto del ragionamento nulla cambia.

2.4 Probabilità di superamento della barriera bilaterale rappresentativa di un DS

Il calcolo della probabilità di superamento di una certa barriera da parte di un oscillatore elementare è un problema, non certo facile, ma trattato ampiamente nella letteratura specialistica (cfr. per esempio [3] e tutti gli sviluppi della scuola degli Autori citati).

La probabilità di non superamento $P_{NS} = P(X \leq b | A = a)$ di una certa barriera bilaterale $\pm b_k$ che corrisponde ad un certo DS è data dalla RVT con la seguente espressione:

$$P_{NS} := 1 - e^{-\frac{b^2}{\lambda_0}} e^{-\alpha_U T_S}$$

con:

$$\alpha_U := \frac{2v_u \left(1 - e^{-\frac{1}{2} \sqrt{2} \sqrt{\frac{\pi b q_u^{1.2}}{\lambda_0}}} \right)}{e^{\frac{1}{2} \frac{b^2}{\lambda_0}} - 1}$$

Tutte le espressioni precedenti per il tramite della PSD $\mathbf{G}=\mathbf{G}(\omega)$ dipendono dalla PGA (S_0) e dallo smorzamento ξ e pertanto dal regime di funzionamento (elastico o plastico) del sistema in relazione all'accelerazione assunta nel calcolo.

La probabilità di superamento è quindi: $P_S = 1 - P_{NS} = P(X > b | A = a)$

Con tali espressioni e con la linearizzazione citata al §2.2 è quindi possibile costruire una relazione bilaterale tra accelerazione al suolo PGA (S_0) e la probabilità di superamento P_S di un valore di soglia b_k che rappresenta lo stato di danno k -esimo indagato per l'oscillatore che ha una certa capacità $\{f_y, d_u\}$.

Tale curva di danneggiamento è in letteratura detta anche curva di fragilità³ per lo stato di danno k .

2.5 Procedura operativa per il calcolo del rischio sismico

Assunto un oscillatore elementare di parametri $\{T, \xi, f_y, d_u\}$ e fissato come parametro di scuotimento la PGA (si pone $a = \text{PGA}$) gli elementi per un'Analisi Quantitativa di Rischio Sismico sono tutti noti e essa si svolge tramite i seguenti passi:

1. Definizione delle soglie di danno DS_k rappresentative delle singole barriere bilaterali $\pm b_k$ che il parametro di risposta (d) non deve superare per non superare un certo stato di danno DS_k . Questi sono dati caratteristici del serbatoio;
2. Definizione della curva di pericolosità sismica del sito $H = H(a)$ e dello spettro elastico $S_{ae} = S_{ae}(T)$ per valori crescenti di PGA, ossia per diversi periodi di ritorno secondo la pericolosità sismica di base, (come da NTC per il caso dell'Italia, come da EC8 o altre normative applicabili per altri contesti);

³ Non si ritiene, in questa sede, particolarmente utile differenziare tra "curva" o "funzione" di fragilità, non comportando tale distinguo variazione alcuna del comportamento fisico-meccanico del sistema analizzato.

3. Costruzione della curva di capacità **V-d** (cfr. §3.2);
4. Definizione del parametro **R = S_{ae}(T₀)/a_y** in relazione alla PGA fissata;
5. Definizione dell'oscillatore elastico lineare equivalente **{T_{eff}, ξ_{eff}}** e degli spettri sovrasmorzati in accelerazione e spostamento dipendenti da **R**;
6. Definizione della PSD **G=G(ω)** associata ad ogni spettro in accelerazione fissato per l'analisi;
7. Definizione della probabilità **P_s** che il parametro di risposta ecceda i valori della barriera **b_k** tramite le equazioni della RVT.

I passi 4-7 si ripetono per ogni valore di PGA, in sequenza, fino ad ottenere una serie di punti discreti della curva **f_k = f_k(a)** che definirà, per una data barriera **±b_k** ossia per un dato stato di danno *k* (DS_k), la probabilità di superamento della barriera.

Questa curva costituisce, per punti discreti, la curva di danneggiamento del serbatoio con riferimento ad un certo stato di danno e, per costruzione, ogni valore definisce la probabilità che lo stato di danno *k*-esimo sia superato per il valore di **a_h**:

$$f_k(a_h) = P(D > DS_k | A = a_h).$$

A questo punto il rischio sismico **R_s = P_f** inteso come probabilità di superamento del fissato DS_k definito dalla usuale equazione di rischio [10] è quantitativamente noto:

$$P_f = \int_0^{+\infty} P[D > DS_k | a] \left(-\frac{dH}{da} \right) da$$

Nella letteratura specialistica richiamata [10], la precedente espressione è comodamente ricondotta ad una forma chiusa, assunto che la curva di danneggiamento sia interpolata secondo una legge log-normale.

3 Applicazione ai serbatoi sferici in fase sismica

3.1 Premessa sul comportamento meccanico dei serbatoi sferici

Nonostante la semplicità geometrica dei serbatoi sferici il loro studio in fase sismica presenta una serie di peculiarità che lo rende particolarmente delicato sul piano meccanico. Infatti: l'interazione tra le colonne di supporto ed il mantello del serbatoio, la presenza dei controventi tra le colonne (e quindi la loro spiccata non linearità geometrica), il grado e la modalità di connessione delle colonne al mantello sono problematiche indagate in letteratura, con risultati non sempre uniformi.

A livello normativo, le fonti sia di matrice Europea che Americana non forniscono indicazioni specificamente sviluppate per tali sistemi. Essi sono trattati più in dettaglio in alcune linee guida Giapponesi, di recente mutate praticamente in modo integrale in un progetto di ricerca UE dedicato allo studio dei sistemi strutturali in ambito industriale, tra cui appunto i serbatoi in questione.

I confronti numerici svolti in quella sede – oltre a validare l'approccio computazionale descritto – hanno avuto anche la finalità di calibrare alcune calcolazioni manuali utili per le finalità del presente studio. Infatti, la curva di capacità, ossia la curva forza-spostamento orizzontale del sistema mantello-colonne, è facilmente ottenuta

considerando la capacità delle colonne come elementi monodimensionali pressoinflessi, assunto che siano rispettate le varie regole di proporzionamento geometrico tra i vari elementi e definite in modo corretto le lunghezze delle parti deformabili delle colonne stesse, al fine di cogliere in modo adeguato il periodo proprio del sistema.

Un altro tema che va adeguatamente considerato, anche in presenza di modellazioni dettagliate (i.e. modelli FEM che contemplano non linearità meccaniche, geometriche) è il comportamento delle colonne tubolari pressoinflesse: esse presentano infatti alcune particolarità nella risposta ciclica ad azioni orizzontali, che non sono adeguatamente approfondite nelle regole di progettazione cogenti.

Considerato il caso di riempimento massimo del serbatoio (quindi, al tempo stesso, la maggior forza d'inerzia e la maggior massa sismica possibili) è possibile – con semplici calcolazioni – ottenere la curva carico/spostamento, che è uno dei dati necessari allo sviluppo dell'analisi di rischio sopra definita.

3.2 Stima della curva di capacità di un serbatoio sferico

Gli studi di letteratura specialistica mostrano come, rispettate le regole di proporzionamento geometriche definite in varie linee guida (quali ad es. quelle Giapponesi) la connessione mantello-colonna può essere adeguatamente rappresentata come un vincolo rigido alla rotazione. Pertanto, la singola colonna sarà un sistema in cui la rigidezza laterale è facilmente valutata con espressioni speditive. Nel caso di serbatoi sferici senza controventi ed incastro alla base delle colonne (c.d. "moment-resisting LLRS⁴") le stesse sono rappresentabili da un'asta con incastro alla base e doppio pendolo in testa. Per i sistemi controventati (c.d. "braced LLRS") il vincolo alla base è tipicamente una cerniera, vista la presenza dei controventi tesi, e il vincolo di doppio pendolo in testa resta valido.

In questo studio si considera il primo assetto (c.d. "moment-resisting LLRS").

La curva di capacità della colonna, e per moltiplicazione quella dell'intero serbatoio, possono essere facilmente ottenute considerando la sezione anulare in termini di parametri di resistenza: momento al limite elastico M_y , sforzo normale associato N_y e azione assiale di collasso N_u .

Con questi parametri, si può ottenere dalla letteratura specialistica il legame azione laterale-spostamento orizzontale $F-d$, che individua i parametri di definizione della curva di capacità.

Nello specifico lo studio più completo, anche sotto il profilo dell'approccio computazionale non lineare è quello esposto in [11] che tratta specificamente la resistenza e duttilità di colonne tubolari a sezione circolare, che rappresentano, paradossalmente, una tipologia poco considerata nelle norme sulle costruzioni.

In questo studio sono confrontate una serie di analisi numeriche con specifico legame elasto-plastico costitutivo per l'acciaio con i risultati di alcuni test di laboratorio per

⁴ LLRS sta per Lateral Load Resisting System, ossia la tipologia strutturale che assorbe le azioni orizzontali.

colonne a mensola, che quindi rispetto al caso dei serbatoi sferici non controventati rappresentano, con sufficiente accuratezza, le colonne di sostegno sino al punto di flesso della deformata in presenza di azioni orizzontali. I risultati numerici ed analitici sono in ampio accordo ed evidenziano una notevole interazione dei fenomeni di buckling locale al piede delle colonne (il c.d. meccanismo di "elephant foot") oltre all'influenza di una serie di parametri geometrici – tra i quali il parametro di snellezza λ – che hanno il riflesso nelle linee guida di proporzionamento citate. In via sintetica, la resistenza orizzontale massima di una colonna tubolare pressoinflessa è data da:

$$\frac{H_{max}}{H_y} = \frac{0.02}{(R_t \lambda)^{0.8}} + 1.1$$

H_y è la forza orizzontale che porta al limite elastico la sezione della mensola:

$$H_y = M_y(N)/h$$

$M_y = M_y(N)$ è il momento al limite elastico che tiene in conto la presenza dello sforzo assiale N ed è fornito dagli autori come minimo tra due meccanismi: uno di interazione M-N e l'altro che tiene conto dell'effetto buckling (di instabilità per carico di punta) della colonna stessa. Il minimo tra i due valori di M_y rappresenta quello di calcolo.

Lo spostamento al limite elastico è quindi: $d_y = H_y/3EJ$

Pertanto, il primo punto caratteristico della curva $V-d$ è determinato: il valore della soglia elastica della mensola. Dalla mensola si passa alla colonna del serbatoio che ha i predetti vincoli alle estremità in modo diretto.

Per quanto riguarda lo spostamento orizzontale limite della colonna a mensola, d_m , gli autori dello studio propongono di considerare un parametro di spostamento d_{95} che corrisponde allo spostamento associato ad una riduzione del carico massimo H_{max} del 95% dopo il picco stesso, che tiene conto anche della presenza dello sforzo assiale:

$$d_{95} = \frac{0.24}{\sqrt[3]{\left(1 + \frac{N}{N_y}\right)^2 \lambda} R_t}$$

Questo può essere assunto ragionevolmente come spostamento massimo della mensola tubolare e il valore di forza orizzontale competente è $H_m = 0.95 H_{max}$, pertanto la curva carico-spostamento per la mensola è costruita. Di conseguenza, si può considerare costruita anche quella del sistema di colonne che supporta il mantello. Pertanto, le caratteristiche in termini di curva di capacità dell'oscillatore elementare con cui si può schematizzare il serbatoio sferico per l'analisi quantitativa di rischio risultano determinate.

Sono di interesse anche gli argomenti di carattere computazionale che meritano di essere considerati nel caso di modellazione di dettaglio del sistema, i cui risultati andranno confrontati con i semplici calcoli prima esposti per opportuna validazione. Come già anticipato, gli sviluppi numerici di modellazione verranno esposti e

rappresentati nel corso della sessione orale dell'evento, per approfondirne la parte squisitamente applicativa.

Il medesimo approccio [11] è stato ulteriormente sviluppato in altre ricerche piuttosto recenti, che ne confermano l'impianto teorico e l'affidabilità dei risultati. Pertanto, esso può essere assunto come riferimento tecnico di comprovata validità a supporto di una progettazione/analisi più dettagliata.

4 Studio numerico

La procedura di valutazione del rischio indicata nel suo sviluppo al §2.5 è applicata ad un caso specifico. Si sceglie il serbatoio analizzato in dettaglio in [15].

Diametro esterno: 19700mm
 Spessore del mantello: 74.5 mm (costante)
 Altezza all'equatore: 12000mm
 Colonne: $\phi 1016/18$

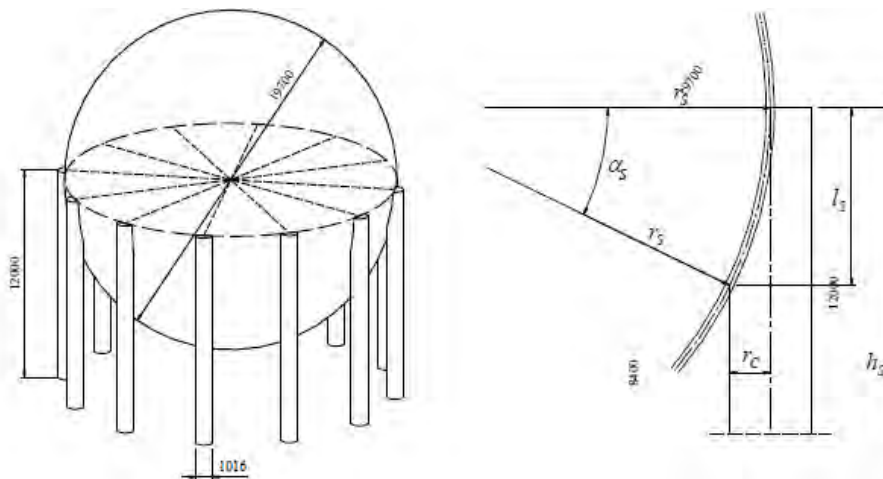
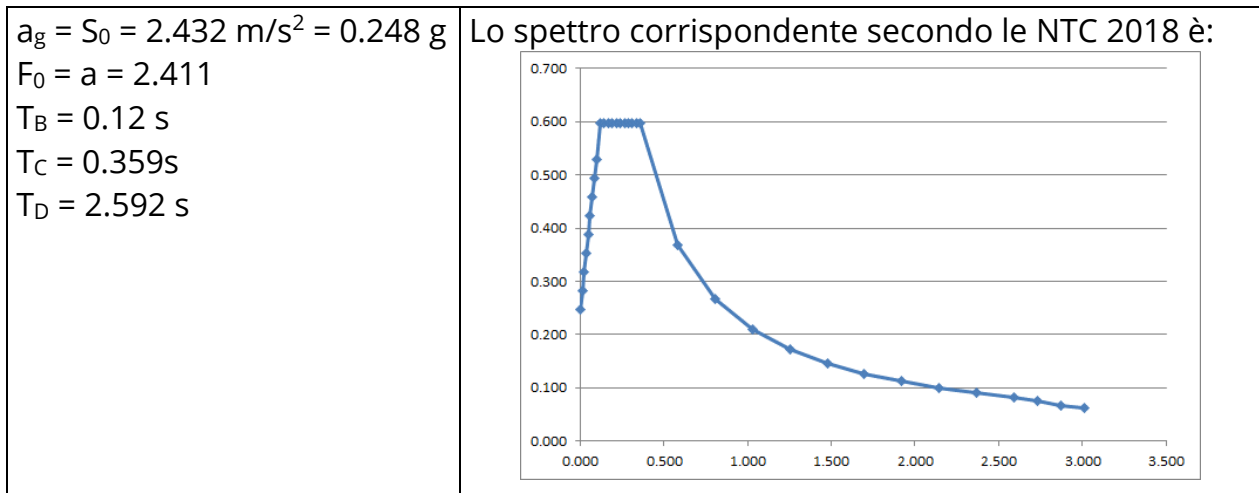


Figura 3. Geometria del serbatoio oggetto di studio

Per tale serbatoio si hanno i seguenti dati dai calcoli riportati nell'articolo:

| | |
|--------------------------------|------------------------|
| Periodo proprio del sistema | $T_0 = 1.57s$ |
| Spostamento al limite elastico | $d_y = 132 \text{ mm}$ |
| Spostamento ultimo | $d_u = 265 \text{ mm}$ |

Per il sito i parametri sismici sono i seguenti:



Il passaggio dallo spettro alla PSD avviene coi seguenti parametri, specifici per lo spettro in esame:

$$G_0 = 0.01414 \text{ (m/s}^2\text{)}^2\text{/(rad/s)}$$

$$\{e_k\} = \{2.5094; 0.7594; -1.3177; -2.6209\}$$

Con tali parametri la PSD corrispondente è rappresentata di seguito:

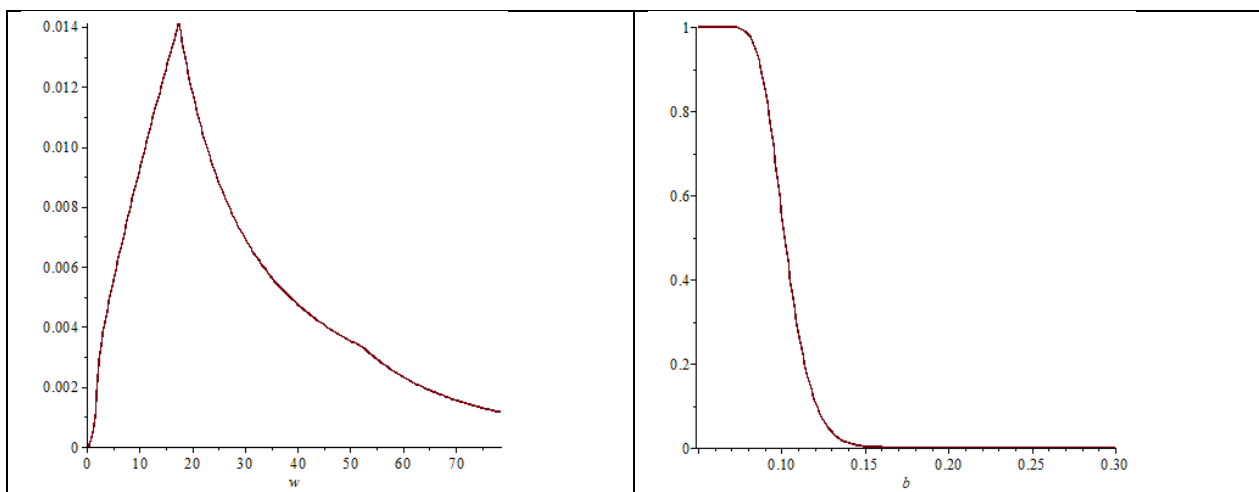


Figura 4. a) Grafico della PSD spettro-coerente (sx); b) probabilità di superamento di differenti soglie di spostamento (dx)

Nella precedente figura, a destra, si riporta anche la curva che definisce la probabilità superamento di una certa soglia di spostamento **b** (espresso in metri) considerato l'input sismico descritto dallo spettro fissato.

La curva mostra quanto atteso: piccoli valori dello spostamento sono attinti con probabilità alte, mentre evolvendo lo spostamento da attingere la probabilità dell'evento si riduce.

La curva di maggior interesse è invece quella che è stata definita come curva di danneggiamento (o di fragilità) connessa agli stati limite del §2.3.

A titolo di esempio si considerano i DS1 e DS4 caratterizzati dai limiti:

DS1: $d \geq 0,9d_y = 0,9 \cdot 0,132 \sim 0,12 \text{ m}$

DS4: $d \geq d_u = 0,265 \text{ m}$

Le curve che descrivono le probabilità di superamento dei due stati di danno sono rappresentate di seguito:

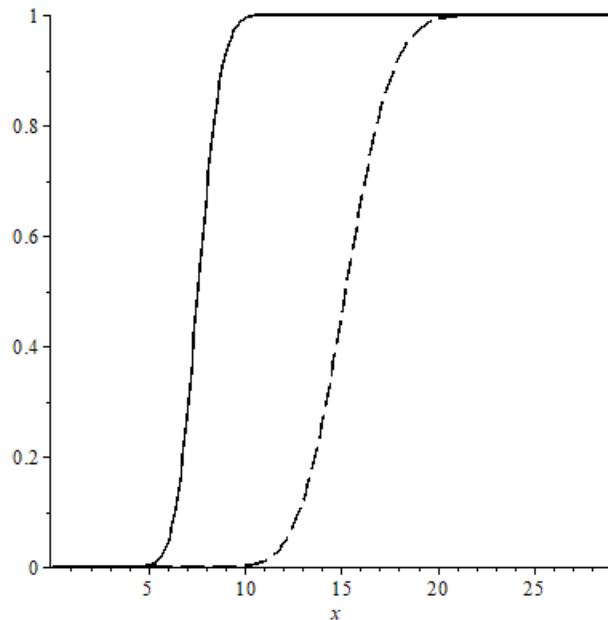


Figura 5. Curve di danneggiamento per DS1 (continua) e DS4 (tratteggiata)

La curva riporta in ascissa il parametro $x = F_0 \cdot a_g$ ossia il valore della massima accelerazione dello spettro. Nulla vieta di riportare il tutto alla PGA con un semplice cambio di variabile.

Si deve notare come queste curve, dalla caratteristica forma sigmoidale, siano specificamente rappresentative del serbatoio in esame e non di una classe tipologica, e pertanto, opportunamente trattate, possono essere inserite nelle analisi di rischio in modo diretto per considerare in modo puntuale lo specifico sistema.

Inoltre, i limiti di spostamento associati ai vari DS sono suscettibili di adattamento al sistema o al contesto specifici.

5 Considerazioni e conclusioni

L'applicazione della RVT a supporto della QRSA di SSC si rivela un utile ed efficace strumento per la valutazione affidabile e speditiva del rischio, anche e soprattutto all'interno di sistemi complessi e ad alto potenziale di danneggiamento in termini di beni, ambiente e vite umane, quali quelli a Rischio Incidente Rilevante (RIR) del comparto industriale. La responsabilità dei professionisti tecnici chiamati ad intervenire nella progettazione ex novo e/o su patrimonio esistente implica la conoscenza delle norme e dei relativi limiti, così come la responsabilità dei titolari delle attività industriali (e degli Enti deputati al controllo ed alla gestione territoriale) implica la conoscenza ed il controllo della prestazione desiderata, ossia della soglia rappresentativa della probabilità di accadimento dell'evento previsto.

6 Bibliografia

- [1] European seismic code: EN 1998-1:2004: Eurocode 8 – part 1 (CEN, 2003);
- [2] DM 9/5/2001 *"Requisiti minimi di sicurezza in materia di pianificazione urbanistica e territoriale per le zone interessate da stabilimenti a rischio di incidente rilevante"*
- [3] M. Di Paola - L. La Mendola in AAVV *"Problemi strutturali nell'ingegneria sismica"* Dario Flaccovio, 1990
- [4] N. Mordà - C. De Simone *"Progettazione sismica delle componenti industriali con approccio Risk-Based"* SAFAP 2016 (ID22)
- [5] E. M. Rathje - A. R. Kottke *"Procedures for random vibration theory based seismic site response analyses"* Report GR08-09 TU Austin, 2008
- [6] J.B. Roberts - P.D. Spanos *"Random Vibration and statistical linearization"* J. Wiley&Sons 1999
- [7] N. Makris - G. Kampas *"Estimating the "effective period" of bilinear systems with linearization methods, wavelet and time-domain analyses: From inelastic displacements to modal identification"* Vol. 45, 2/2013,
- [8] Vanmarcke E.H. (1975). *"Distribution of first-passage time for normal stationary random processes"*, J. Appl. Mech.,Trans., ASME, 42: 215-220.
- [9] S. Grimaz - P. Malisan *"Near field domain effects and their consideration in the international and Italian seismic codes"* Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata Vol. 55, n. 4, pp. 717-738; December 2014
- [9] Nastasi et al *"Valutazione del rischio NaTech indotto dal sisma alla luce del d.lgs. 105/2015 e delle NTC"* - Conf. VGR2016
- [10] R. Mc Guire et al *"An introduction to probabilistic seismic hazard analysis"* in AAVV S.H. Ward *"Geotch. and Envin. Geophysics"* Tulsa OK, 1991
- [11] S. Gao et al *"Ductility Evaluation of Steel Bridge Piers with Pipe Sections"* Journal of Engineering Mechanics Volume 124, Issue 3, 1996;
- [12] DM 17/1/2018 Aggiornamento delle norme tecniche per le costruzioni;
- [13] Circolare 7/2019 Istruzioni per le norme tecniche per le costruzioni;
- [14] G. M. Calvi – R. Nascimbene *"Seismic design and analysis of tanks"* J. Wiley&Sons, 2023
- [15] M. Wieschollek et al *"Guidelines for seismic design and analysis of pressure vessels"* PVP 2013, Paris

Valutazione degli scenari di rischio a seguito di rilascio GPL negli stabilimenti con pericolo di incidenti rilevanti. Caso Studio

V. Nastasi¹, A. Muratore², M. Bellissimo¹, G. Giannelli², G. Grillone¹

¹ Inail - Uot di Palermo

² Inail - Uot di Como

Abstract

Gli incidenti che comportano il rilascio accidentale di gas di petrolio liquefatto (GPL) possono causare danni molto gravi a persone e strutture; la pericolosità di detti rilasci deriva dalla infiammabilità e dalla tendenza a formare una densa nube di vapore dispersa nell'atmosfera che si può spostare a distanza elevata dal rilascio.

Scopo del presente lavoro è introdurre un metodo per identificare e valutare tutti i possibili scenari per i depositi GPL che rientrano nelle attività a rischio di incidente rilevante al fine di determinare il livello di rischio associato a detti scenari, per una valutazione sulla relativa tollerabilità. Tali scenari sono alla base di una corretta pianificazione territoriale e di una pianificazione emergenziale interna ed esterna; a tal proposito si deve considerare anche l'ultima dir. della Presidenza del Consiglio dei Ministri - Dipartimento della Protezione Civile del 7 dicembre 2022.

Nell'ambito dei processi di pianificazione delle emergenze, tale metodo proposto può essere utile nel supportare le autorità a definire le zone di danno, laddove non si disponga dei dati minimi necessari per elaborare uno scenario incidentale, ovvero non si abbiano determinazioni conclusive dei Comitati Tecnici Regionali (C.T.R.) in esito alle istruttorie tecniche sui rapporti di sicurezza, o ancora quando le uniche informazioni disponibili siano quelle provenienti dalle notifiche (tipicamente per gli stabilimenti seveso di soglia inferiore). Inoltre nell'ambito della pianificazione urbanistica, può essere utile per una prima stima immediata delle conseguenze di eventi incidentali non valutate dai gestori, includendo in questo novero anche i casi di scenari con probabilità di accadimento marginali.

1. Evoluzione del rilascio GPL. Fenomeni pericolosi più comuni

Nella sequenza cronologica rappresentata in Figura 1, gli autori schematizzano la successione di possibili fenomeni derivanti dal rilascio di GPL dovuto a una qualsiasi causa, come una perdita da una valvola del serbatoio, un errore durante la fase di trasferimento, la formazione di una perdita sul serbatoio a causa di un impatto o di un ribaltamento, ecc..

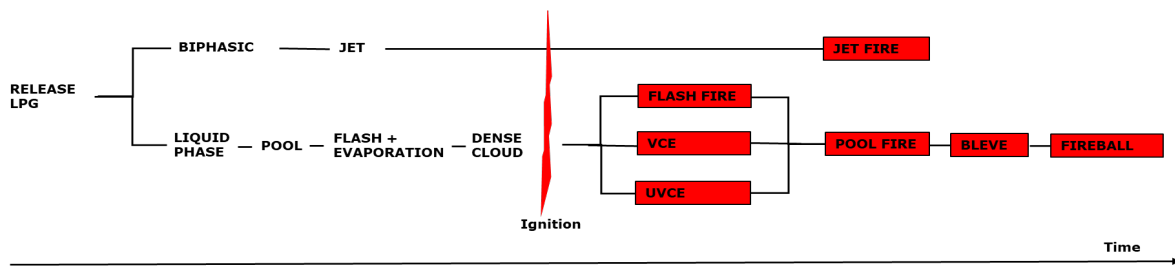


Figura 1. Albero degli eventi successivi al rilascio di GPL

In seguito alla perdita di GPL liquido, parte di esso evapora per flash, mentre la frazione GPL sottoraffreddata forma una pozza, da cui avviene un'ulteriore evaporazione.

Due fattori determinano la diluizione di una nuvola di vapori di GPL:

- Vento (direzione e velocità): determina la distanza della nube dalla fonte di dispersione;
- Turbolenza: determina la diluizione della nube e la sua miscelazione con l'aria.

In generale, condizioni di instabilità si verificano quando il sole riscalda il suolo causando turbolenti moti convettivi; Le condizioni di stabilità atmosferica sono invece notturne.

I fenomeni pericolosi più comuni per il GPL [1] sono:

Poolfire: la combustione di materiale che evapora da uno strato di liquido (pozza). Il verificarsi dello strato di liquido deriva dal guasto di apparecchiature contenenti un liquido infiammabile;

Jet fire: la manipolazione di liquidi o gas infiammabili pressurizzati può portare a un incendio a getto in caso di perdita su un tubo o su un recipiente. L'accensione del fluido porta a formare una fiamma a getto caratterizzata da un'elevata energia radiante (largamente superiore alla radiazione della pozza) e da una notevole energia cinetica.

Flash fire, VCE, UVCE: Quando si verifica una perdita su un elemento dell'apparecchiatura, può verificarsi un rilascio gassoso, direttamente o in seguito alla graduale vaporizzazione di una pozza sul terreno vicino alla perdita. Questo evento porta alla formazione di una nuvola che va alla deriva e si disperde con il vento. Se la sostanza è infiammabile, esiste una zona intermedia in cui le concentrazioni di vapore nell'aria sono comprese tra i limiti di infiammabilità della sostanza. Una fonte di accensione sufficientemente energetica, sulla traiettoria della zona infiammabile della nube, può accendere questa nube. A seconda della velocità della fiamma frontale, si avrà un Flash fire o una esplosione confinata (VCE, Vapour Cloud Explosion). Quest'ultimo evento provoca un'onda di sovrappressione - sottopressione. Un effetto devastante è associato alla sovrappressione di picco così come alla forma dell'onda. La probabilità che una nube di GPL determini la sua esplosione non confinata, (UVCE, Unconfined Vapor Cloud Explosion) anziché un

flash fire, dipende essenzialmente dalla geometria del luogo in cui si estende la nube.

BLEVE, Fireball, Espulsione di missili: Il termine BLEVE è l'acronimo di Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion, è un tipo di fenomeno che può derivare da una rottura catastrofica. Esso può verificarsi quando un recipiente, contenente un liquido altamente surriscaldato al di sopra del suo normale punto di ebollizione atmosferico, ha un cedimento strutturale catastrofico. Il rischio di un BLEVE è tipicamente associato allo stoccaggio di gas liquefatto pressurizzato o liquidi pressurizzati. La prima conseguenza di un BLEVE è un effetto di esplosione dovuto all'espansione del vapore quando il recipiente si rompe e alla vaporizzazione esplosiva del contenuto liquido del recipiente. Questo effetto è generalmente seguito dall'espulsione dei missili. Se la sostanza è infiammabile, l'aerosol aria-sostanza può incendiarsi immediatamente. Il fronte di fiamma si allontana rapidamente dal punto di accensione, generando una palla di fuoco. La sua temperatura è estremamente elevata e provoca un importante irraggiamento termico.

2. Diagramma Bow-tie

Dopo l'introduzione di carattere qualitativo inerenti i fenomeni conseguenti al rilascio di GPL con le relative sorgenti di innesco e i meccanismi di evaporazione, cercheremo in modo sintetico di introdurre un metodo per l'identificazione degli scenari incidentali. In questo lavoro si propone di utilizzare i diagrammi "bow-tie" che hanno una loro forza visiva per l'individuazione dei diversi scenari incidentali [1]. Tali diagrammi sono centrati nell'evento critico (CE), definito come perdita di contenimento o perdita di integrità fisica, sulla sinistra è presente l'albero dei guasti, che identifica le possibili cause dell'evento critico, mentre sulla destra del diagramma si ha l'albero degli eventi, che individua le possibili conseguenze. La novità della metodologia consiste nel definire in modo preciso la struttura a "bow-tie", identificando accuratamente i dispositivi, i potenziali eventi critici e le loro conseguenze. Attraverso una descrizione accurata dell'impianto, comprendendo anche le sostanze usate, siano esse prodotte o stoccate, è possibile creare una lista di eventi che potrebbero verificarsi nel sito. Di seguito è rappresentato lo schema del cosiddetto diagramma "bow-tie".



Figura 2. Uno scenario illustrato in un diagramma "Bow-tie"

Come indicato sul lato sinistro del diagramma "Bow-tie", uno scenario di riferimento inizia tipicamente con un evento iniziale (IE) che porta all'evento critico (CE). Mentre a destra del diagramma si raffigura lo sviluppo dello scenario (SCE) dopo l'"evento critico" che porta alla realizzazione di un fenomeno pericoloso (DP) come Pool Fire, Flash Fire, VCE, BLEVE, Fireball, ecc.. Da tali fenomeni pericolosi "DP" si producono eventi maggiori degli scenari "ME", come radiazione termica, contatto diretto della fiamma, sovrappressione, espulsioni di missili. Tutto questo porta a conseguenze indesiderabili per l'uomo (infortuni mortali e gravi), per l'ambiente, nonché danni economici rilevanti. Nella Tabella 1 che segue si mostrano alcuni esempi tipici di ciascuna di queste categorie.

| Evento Iniziale (IE) | Evento Critico (CE) | Fenomeno Pericoloso (DP) | Conseguenza indesiderabile |
|-----------------------------|--|--|--|
| Sovrappressione | Rottura catastrofica di un Serbatoio | BLEVE | Infortuni gravi e mortali e Danni materiali e ambientali |
| Corrosione | Foro sulla membratura di un Serbatoio | Pool fire | Infortuni e Danni materiali e ambientali |
| Flangia allentata | Perdita tubazione | Flash fire, Pool Fire, Jet fire | Infortuni e Danni materiali e ambientali |
| Autorefrigerazione | Rottura Catastrofica Serbatoio | BLEVE (*) | Infortuni, Danni ambientali e materiali |
| Sisma, Alluvione | Perdita nelle tubazioni, Rottura castastrofica | Flash fire, Pool Fire, Jet fire, BLEVE | Infortuni, Danni Materiali e ambientali |

(*) Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion

Tabella 1. Alcuni esempi di elementi di uno scenario tipico di incidente

Come si può evincere alla base di uno scenario incidentale vi è una Perdita di GPL legato ad una attrezzatura contenente GPL; ad esempio: Serbatoio di stoccaggio pressurizzato GPL; Pompa/compressore GPL; Tubazioni GPL; Braccio/tubo di carico/scarico GPL; Autocisterna GPL / Cisterna ferroviaria.

3. Valutazione delle frequenze dell'evento pericoloso (DP)

Per arrivare a determinare la valutazione del fenomeno pericoloso (DP, lato destro del diagramma "bow-tie") occorre partire dagli eventi iniziali (IE). Una volta identificati quest'ultimi, l'obiettivo è quello di fornire i valori della loro frequenza, definiti come la prima causa a monte di ogni ramo che conduce all'evento critico nell'albero dei guasti. Nella letteratura scientifica vi è una scarsa informazione in

questo campo. Dove è possibile è bene utilizzare dati precisi dell'impianto o almeno cercare di stimare le frequenze con i dipendenti o con dati estrapolati dall'esperienza operativa di altri stabilimenti simili. In questa ottica alla luce dell'esperienza in campo degli autori nonché dell'esperienza operativa in stabilimenti GPL, si possono individuare la frequenza di accadimento per anno degli "IE":

$F < 10^{-4}$, frequenza molto bassa, evento improbabile;

$10^{-4} < F < 10^{-3}$, frequenza bassa, l'evento potrebbe verificarsi o si è verificato almeno 1 volta in 1000 anni;

$10^{-3} < F < 10^{-2}$, frequenza bassa, evento potrebbe verificarsi o si è verificato almeno 1 volta in 100 anni;

$10^{-2} < F < 10^{-1}$, frequenza elevate, evento possibile, si è verificato nel sito almeno 1 volta in 10 anni;

$F > 10^{-1}$, frequenza molto elevate, evento probabile, si è verificato più volte all'interno del sito.

Una volta trovati i valori delle frequenze "IE" è necessario indicarli sul diagramma "bow-tie". Il passo successivo è quello di identificare le funzioni e i sistemi di sicurezza (barriere di prevenzioni) sull'albero dei guasti, valutando le loro prestazioni e come questi influiscono sulla frequenza degli eventi critici (CE). Questa metodologia nasce dagli eventi iniziali (IE) dell'albero dei guasti e procede verso gli eventi critici (CE), tenendo in considerazione i sistemi di sicurezza. Se non si può calcolare la frequenza dell'evento critico sulla base dell'analisi dell'albero dei guasti esiste la possibilità di valutarla attraverso frequenze di eventi critici generici. Nell'Appendice 10 del Deliverable D.1.C. ([2] Delvosalle C. et al.) sono forniti valori o intervalli di frequenze dei diversi eventi critici, a seconda del tipo di apparecchiatura considerata. Di seguito si mostra un estratto, dove la sigla "CE" indica il tipo di evento critico preso in esame, mentre "EQ" è l'apparecchiatura colpita da quest'ultimo:

| Failure frequency (/year) | | Breach on the shell in vapour phase | | Breach on the shell in liquid phase | | Leak from liquid pipe | | Leak from gas pipe | |
|------------------------------|------|---|-----------|---|-----------|--------------------------|-----------|-----------------------|-----------|
| | | CE6 | | CE7 | | CE8 | | CE9 | |
| Pressure storage | EQ4 | 10mm | 5 E-05 | 10mm | 5 E-05 | All fittings | 0.15 E-3 | All fittings | 0.15 E-3 |
| | | 35mm | 5 E-06 | 35mm | 5 E-06 | | | | |
| | | 50mm | 1 E-06 | 50mm | 1 E-06 | | | | |
| | | 100mm | 5 E-07 | 100mm | 5 E-07 | | | | |
| Pipe | EQ10 | | | | | /year and /m | ND <75mm | 75mm < ND | ND |
| | | | | | | | | <150mm | >150mm |
| | | | | | | 10% of ND | 1.18 E-05 | 2.5 E-06 | 1.75 E-06 |
| | | | | | | 22% of ND | 7.93 E-06 | 1.11 E-06 | 6.5 E-07 |
| | | | | | | 44% of ND | 3.3 E-06 | 4.62 E-07 | 2.7 E-07 |
| | | Full bore rupture | 1.22 E-06 | 3.5 E-07 | 1.18 E-07 | | | | |

Figura 3. Estratto delle frequenze generiche degli eventi critici (CE)

Le frequenze sopra individuate sono di carattere generico e fornite per livelli di sicurezza "standard", anche se in letteratura non sono specificati; occorre quindi utilizzare i dati con attenzione.

Una volta individuato l'intervallo in cui può ricadere la frequenza, si deve scegliere un valore al suo interno, possibilmente alto se sono presenti bassi livelli di sicurezza o, viceversa nel caso il livello di sicurezza è buono. Le informazioni trovate in letteratura non permettono di fornire informazioni più precise in merito alla scelta di un valore specifico. Una volta definito la frequenza dell'evento critico (CE), per il calcolo della frequenza del fenomeno pericoloso (DP) occorre procedere passo a passo nell'albero degli eventi (lato destro del diagramma "Bow-tie"), ottenendo come output la frequenza di ogni fenomeno pericoloso. Prima di tutto è necessario valutare come si propagano le probabilità lungo i rami dell'albero e tenere in considerazione i dispositivi di protezione. Quindi individuare i dispositivi di sicurezza da inserire nell'albero degli eventi e quantificare la loro influenza. L'output di questa fase è individuare i diversi fenomeni pericolosi (DP) associati ad ogni singolo evento critico (CE). Una volta calcolata la frequenza di accadimento di un evento pericoloso (DP), ad essa viene associata, alla luce dell'esperienza operativa degli autori, una "classe di frequenza":

- F-1 per valori di $1,0 \text{ E } -03$;
- F-2 per valori di $1,0 \text{ E } -04$;
- F-3 per valori di $1,0 \text{ E } -05$;
- F-4 per valori di $1,0 \text{ E } -06$;
- F-5 per valori di $1,0 \text{ E } -07$.

Si evidenzia a tal proposito che le classi di frequenza prima descritte debbono tenere conto anche della presenza di efficaci sistemi di gestione della sicurezza per la prevenzione degli incidenti rilevanti (SGS-PIR) obbligatori per gli stabilimenti rientranti nella direttiva Seveso. Essi come si sa dall'esperienza in campo, hanno una forte capacità di controllo del rischio; infatti, individuano azioni legati a fattori tecnici, umani, organizzativi e di gestione con l'obiettivo di monitorare le barriere di prevenzione e/o protezione al loro massimo livello per prevenire gli incidenti e limitarne le conseguenze all'interno e all'esterno del sito produttivo. A tal proposito occorre ricordare che prima nell'Allegato 3 del D.Lgs. 105/15 e successivamente nell'Allegato B (art.14) dello stesso Decreto Legislativo tra gli aspetti che devono essere trattati nell'ambito dei SGS-PIR si devono prevedere *"le procedure per l'identificazione e valutazione dei rischi di incidenti rilevante derivanti dall'attività normale o anomala comprese, se del caso, le attività subappaltate e l'adozione delle misure per la riduzione del rischio, assicurando la loro corretta applicazione e il mantenimento nel tempo della loro efficacia."* Ed inoltre *"Le attività di identificazione e valutazione ... devono essere condotte sia in termini di probabilità sia di gravità e documentate nell'ambito di un'analisi di sicurezza espletata secondo lo stato dell'arte, ..."*.

A tal proposito è importante capire se i SGS-PIR sono stato oggetto nelle ultime ispezioni di legge di apposite raccomandazione o prescrizioni; e se in presenza di queste ultime, il gestore abbia ottemperato.

4. Stimare la classe di danno legate al fenomeno pericoloso

Individuati i fenomeni pericolosi "DP" dovuti al rilascio di GPL, tramite la successiva tabella 2 che segue, si mettono in relazione i possibili eventi maggiori degli scenari finali "ME".

| Fenomeno Pericoloso (DP) | ME1 Radiazione Termica | ME2 Contatto Diretto Fiamma | ME3 Sovrappressione | ME4 Missile |
|---------------------------|---------------------------|--------------------------------|------------------------|----------------|
| Pool Fire, (DP1) | X | X | | |
| Flash Fire, (DP2) | X | X | | |
| VCE, (DP3) | | | X | X |
| Jet Fire, (DP4) | X | X | | |
| BLEVE e Fireball, (DP5) | X | | X | X |
| Espulsione missili, (DP6) | | | | X |
| Sovrappressione, (DP7) | | | X | |

Tabella 2. Relazione fenomeni pericolosi "DP" e eventi maggiori scenari finali "ME"

La valutazione delle conseguenze degli eventi maggiori degli scenari "ME" è basata principalmente sulla applicazione dei modelli che rappresentano i fenomeni fisici conseguenti la perdita di contenimento da una tubazione o di un serbatoio GPL, che si manifesta come rilascio di materia e/o di energia. Al fine di determinare le conseguenze dei grandi eventi (ME) degli scenari finali, gli autori propongono di utilizzare il metodo Shortcut [3],[5]. Con tale metodo il danno è correlato all'effetto fisico mediante il criterio di vulnerabilità rappresentato dal superamento di un valore di soglia. In analogia con quanto previsto dalla vigente normativa in materia ci si riferisce ai quattro valori di soglia (Figura 4) corrispondenti a:

- 1, effetti ad alta letalità;
- 2, effetti di inizio letalità;
- 3, effetti che comportano gravi lesioni irreversibili;
- 4, effetti che comportano lesioni reversibili.

| Scenario incidentale | Elevata letalità (1) | Inizio letalità (2) | Lesioni irreversibili (3) | Lesioni reversibili (4) |
|--|---------------------------------------|-----------------------|---------------------------|-------------------------|
| Incendio (radiazione termica stazionaria) | 12,5 kW/m ² | 7 kW/m ² | 5 kW/m ² | 3 kW/m ² |
| BLEVE/Fireball (radiazione termica variabile) | Raggio fireball | 350 kJ/m ² | 200 kJ/m ² | 125 kJ/m ² |
| Flash-fire (radiazione termica istantanea) | LFL | 1/2 LFL | | |
| VCE - UVCE (sovrapressione di picco) | 0,3 bar (0,6 bar per spazi aperti) | 0,14 bar | 0,07 bar | 0,03 bar |
| Rilascio tossico (dose assorbita) | LC ₅₀ (30', hmn) | | IDLH | |

Figura 4. I quattro valori di soglia per tipo di scenario [5].

Per quanto riguarda gli effetti dell'elevata letalità, si propone di distinguere lo stesso, a seconda che si verifichi all'interno dello stabilimento o all'esterno dello stabilimento.

Il metodo Shortcut [3], [5], riporta le distanze (in metri) per le varie soglie di danno sopra elencate ((1),(2),(3),(4)), con riferimento alla quantità di sostanze stoccate (Gas infiammabili liquefatti per compressione) per determinate condizioni meteorologiche di riferimento, (D.5: neutralità con vento 5 m/s, F2: moderatamente stabile con vento 2 m/s) distinguendo per scenari Flash Fire o VCE. Il Metodo Shortcut fornisce la stima delle distanze di danno per due tipologie di scenari incidentali, denominate "ipotesi", entrambe rappresentative di elevati livelli di sicurezza impiantistico-gestionali:

- ipotesi più probabile: è caratterizzata da probabilità relativamente alta e magnitudo contenuta ma comunque rilevante;
- ipotesi media: è caratterizzata da probabilità di accadimento più remote ma ancora credibili e magnitudo di media/elevata gravità, tipica di eventi incidentali rilevanti.

Nella Figura 5 viene illustrato un estratto delle distanze in metri (m) del metodo Shortcut per Gas infiammabili liquefatti per compressione.

| | | Quantità stoccata (t) | | | | | | | | | |
|--------|-----|-----------------------|-----|----------|-----|-----------|-----|-----------|-----|-------|------|
| | | < 40 | | 41 - 160 | | 161 - 240 | | 241 - 400 | | > 400 | |
| Soglia | | D5 | F2 | D5 | F2 | D5 | F2 | D5 | F2 | D5 | F2 |
| | | Più prob. | 1 | 85 | 130 | 85 | 130 | 85 | 130 | 135 | 190 |
| 2 | 120 | | 160 | 120 | 160 | 120 | 160 | 180 | 240 | 240 | 310 |
| 3 | | | | | | | | | | | |
| 4 | | | | | | | | | | | |
| Media | 1 | 140 | 230 | 140 | 230 | 155 | 210 | 230 | 330 | 300 | 440 |
| | 2 | 170 | 280 | 170 | 280 | 185 | 280 | 270 | 420 | 360 | 560 |
| | 3 | 210 | 370 | 210 | 370 | 230 | 370 | 340 | 560 | 460 | 740 |
| | 4 | 330 | 620 | 330 | 620 | 360 | 610 | 530 | 930 | 710 | 1250 |

Figura 5. Distanze in m del metodo Shortcut per Gas infiammabili liquefatti [3], [5]

Alla luce di ciò, dall'esperienza in campo degli autori vengono proposte 5 classi di danni:

- A, effetti che comportano lesioni reversibili all'interno dello stabilimento;
- B, effetti che comportano gravi lesioni irreversibili all'interno dello stabilimento;
- C, effetti di letalità precoce all'interno dello stabilimento;
- D, effetti di letalità elevata all'interno dello stabilimento;
- E, effetti di letalità elevati al di fuori dello stabilimento.

5. Matrice di rischio per selezionare gli scenari di riferimento

La matrice di rischio che segue (Figura 6) fornisce una rappresentazione dei pericoli derivanti dall'accadimento di scenari incidentali senza la necessità di ricorrere ad una valutazione quantitativa del rischio ad essi associato, ma basandosi sulla valutazione separata della frequenza (paragrafo 3) e del livello di conseguenza (classi di danno) di ogni singolo evento (paragrafo 4). La matrice viene ottenuta riportando in un piano la frequenza attesa di accadimento (ordinata) e la severità delle conseguenze associate a ciascun scenario incidentale (ascisse). Pertanto ogni scenario risulta rappresentato da un punto. La posizione di un evento incidentale nella matrice costituisce una misura, seppure qualitativa, del rischio ad esso associato e può essere utilizzata ai fini di una valutazione sulla tollerabilità dei pericoli associati all'evento in esame, consentendo di discriminare tra tutti gli scenari quelli maggiormente critici.



Figura 6. Rappresentazione dei pericoli derivanti dall'accadimento di scenari incidentali

In riferimento a ciò si individuano tre livelli di rischio:

R1, area del rischio tollerabile (area verde). Qualora uno scenario fosse posizionato in tale area, il rischio ad esso associato è da ritenersi tollerabile senza ulteriori

interventi al di fuori del mantenimento degli interventi di prevenzione e/o protezione già in essere.

R2, area di intervento. (area gialla). Nel caso di eventi posizionati in tale area si deve intervenire con misure di prevenzione e/o protezione;

R3, area del rischio non tollerabile (area rossa). Per gli scenari che ricadono in tale area sono considerati non tollerabili ai fini della sicurezza.

Tutti gli eventi finali devono essere inquadrati all'interno della matrice e quelli che rientrano all'interno delle fasce "R2" e "R3" devono essere utilizzati per ulteriori approfondimenti tecnici e gestionali.

6. Caso studio

Se consideriamo un serbatoio GPL con quantità stoccata di 40 tonnellate, ubicato a 150 m dal confine dello stabilimento. Si ipotizza un possibile evento critico (CE) come un foro nel serbatoio (fase vapore) di 35 mm, con condizioni meteorologiche (D.5: neutralità con vento 5 m/s). Nel presente caso studio si fa coincidere, andando a favore di sicurezza, la frequenza dell'evento critico (CE) con la frequenza dell'evento pericoloso (DP); questo significa che non prendiamo in considerazione le barriere di protezione poste sulla destra del diagramma "Bow-tie". Determiniamo a questo punto la frequenza di accadimento e la relativa la classe di danno; da ciò siamo in grado di individuare il punto all'interno della Figura 6 che rappresenta i pericoli derivanti dall'accadimento degli scenari incidentali.

- Determinazione della frequenza di accadimento:

Se consideriamo la frequenza di un possibile evento critico (CE), utilizzando la figura 3 del precedente paragrafo 3: foro nel serbatoio GPL di 35 mm con frequenza di accadimento 5 E -06; per tale frequenza viene associata la classe di frequenza "F-4".

- Determinazione classe di danno:

Entrando nella figura 5 del paragrafo 4, con i valori del nostro caso studio, otteniamo i quattro valori di soglia per l'ipotesi media:

- 1, effetti ad alta letalità = 140 m;
- 2, effetti di inizio letalità = 170 m;
- 3, effetti che comportano gravi lesioni irreversibili = 210 m;
- 4, effetti che comportano lesioni reversibili = 330 m.

Questo significa che nel nostro caso studio non si hanno effetti ad alta letalità al di fuori dello stabilimento ma solo al suo interno; in considerazione secondo la classificazione degli autori la classe di danno (v. paragr. 4) rientra nella tipologia "D". Trovati i due elementi: classe di frequenza "F-4" e classe di danno dello scenario "D"; troviamo che il punto di rappresentazione dei pericoli derivanti dall'accadimento di scenari incidentali oggetto del presente caso studio rientra in R2 (zona giallo), area di

intervento. In tale area si deve intervenire con ulteriori misure di prevenzione e/o protezione.

7. Conclusioni

Con il presente articolo si introduce un metodo per identificare e valutare tutti i possibili scenari per i depositi GPL, che rientrano nelle attività a rischio di incidente rilevante, individuando il livello di rischio associato a ciascuno di detti scenari, per una valutazione sulla relativa tollerabilità. Tali scenari sono alla base di una corretta pianificazione territoriale e di una pianificazione emergenziale interna ed esterna; a tal proposito si deve considerare anche l'ultima dir. della Presidenza del Consiglio dei ministri - Dipartimento della Protezione Civile del 7 dicembre 2022.

Tale metodo proposto può essere utile nel supportare le autorità a definire le zone di danno, laddove non si disponga dei dati minimi necessari per elaborare uno scenario incidentale, ovvero non si abbiano determinazioni conclusive dei Comitati Tecnici Regionali (C.T.R.) in esito alle istruttorie tecniche sui rapporti di sicurezza, o ancora quando le uniche informazioni disponibili siano quelle provenienti dalle notifiche (tipicamente per gli stabilimenti di soglia inferiore).

Nell'ambito della pianificazione urbanistica, può essere utile per una prima stima immediata delle conseguenze di eventi incidentali non valutate dai gestori, includendo in questo novero anche i casi di scenari con probabilità di accadimento marginali.

Infine, e in analogia con altri metodi speditivi, il presente articolo consente di stimare le distanze di danno in conseguenza di incidenti nel trasporto di sostanze pericolose mediante autobotte, ferrocisterna, ecc., tutte fattispecie escluse dal campo di applicazione della direttiva seveso.

8. Bibliografia

[1] Gyenes Z., Wood M. H., Struckl M., Handbook of Scenarios for Assessing Major Chemical Accident Risks, Joint Research Centre (JRC) technical report 2017, DOI:10.2760/884152.

[2] Delvosalle, C., Fiévez, C., Pipart, A., 2006. ARAMIS project: Reference accident scenarios definition in SEVESO establishment, Journal of Risk Research, 9:5, 583-600, DOI: 10.1080/13669870500419529

[3] Andreis, F., Baldacci, S., Lombardi, A., Marotta, F., (2006), Shortcut method for evaluating accident consequences, Publisher: APAT, ARPAT. ISBN: 88-448-0159-0.

[4] Directive 2012/18/EU of the European Parliament and of the Council, 'Control of major-accident hazards involving dangerous substances, amending and subsequently repealing Council Directive 96/82/EC'.

[5] Directive December 7, 2022, Presidency of the Council of Ministers, Guidelines for the preparation of the external emergency plan, guidelines for informing the

population and guidelines for testing external emergency plans, Italian Official Gazette no. 31 of 7 February 2023.

[6] Andraghetti, E; Tesi di Laurea Specialistica 2008/2009 "Stabilimenti a rischio di incidente rilevante: valutazione della vulnerabilità ambientale" (Facoltà di Ingegneria - Univ. Di Bologna);

[7] Bresesti, M; Sannoner, B; Tesi di Laurea Magistrale 2009/2010 "Sicurezza nell'impiego e nel trasporto del gas di petrolio liquefatto (GPL)" (Politecnico Milano);

[8] Baldacci et. Al, Contributo in Atti del Convegno nazionale Valutazione e Gestione del Rischio negli insediamenti civili ed industriali – Pisa, 19-24 Ottobre 2004; "*Modelli semplificati sorgente-diffusione-esplosione di nubi di vapore in ambienti industriali semiconfinati*";

[9] *Linea Guida di ICARO, 2017 "Metodologie per l'elaborazione dell'analisi dei rischi di incidente rilevante"*.

Le ispezioni di integrità attraverso la transizione digitale

R. Marrazzo¹, G. Pinna², M. R. Vallerotonda², P. Bragatto³

¹ISPRA VAL-RTEC

²CTI Milano

³Dipartimento di Ingegneria, Università Campus Bio-Medico

Abstract

Nell'industria di processo i controlli sull'integrità delle attrezzature sono un'attività essenziale per prevenire incidenti, evitare interruzioni indesiderate e perdite di prodotto, prolungare nel tempo la vita utile degli impianti. In questo ambito, da decenni, sono largamente utilizzate tecnologie di controllo non distruttivo che permettono di rilevare le varie forme di deterioramento dei materiali, prima che esse possano portare a guasti o rotture. Le tecnologie di misura utilizzate sono diverse, in funzione anche delle tipologie di danno che si intendono rilevare. In molti casi, mantenendo la stessa tecnologia di misura, è possibile aumentare considerevolmente la numerosità, l'efficacia e la frequenza delle misure, utilizzando diverse tecniche innovative, inclusi sistemi di movimento autonomi (*robot, droni*), comunicazione wireless (*wifi, ble, rfid*), memorizzazione condivisa (*cloud*) e intelligenza artificiale (*machine learning*).

Nel presente lavoro si passano in rassegna le soluzioni innovative che consentono di potenziare, in modo considerevole, le misure di integrità, fra cui le ispezioni con sistemi robotici all'interno e all'esterno di attrezzature, i sistemi pervasivi per il monitoraggio e la visione aumentata. Questi sistemi aumentano in modo esponenziale la disponibilità di dati che è possibile analizzare e consentono di sviluppare modelli previsionali più precisi, e generare rappresentazioni digitali dinamiche degli impianti.

Nella trattazione si analizzano, per le soluzioni individuate come rappresentative, il livello di maturità già raggiunto, l'efficacia ai fini della riduzione dei rischi, l'applicabilità all'interno dei sistemi industriali, la necessità di ulteriori ricerche. Lo studio è stato inoltre propedeutico allo sviluppo di strumenti normativi che faciliteranno il trasferimento dell'innovazione in ambito industriale, anche in riferimento alle attività di controllo nell'ambito dell'attuazione del Sistema di Gestione della Sicurezza, previsto dal d.lgs. 105/2015, attuazione italiana della direttiva Seveso.

Keywords: Sistemi di misura robotizzati, droni di ispezione, monitoraggio con sensoristica pervasiva, gemello digitale, visione aumentata, intelligenza artificiale, sistema di gestione della sicurezza SGS.

1 Introduzione

La transizione digitale negli ultimi anni sta avendo un forte impatto sulla gestione dell'integrità degli impianti di processo. La sensoristica, di ridotte dimensioni e basso costo, può essere distribuita in modo pervasivo in molti elementi nell'impianto, in particolare sui sistemi statici di contenimento (e.g. recipienti e tubazioni in pressione) e sui sistemi dinamici (e.g. pompe, compressori). La sensoristica distribuita aumenta di molto la disponibilità di dati, che a loro volta alimentano lo sviluppo di modelli prognostici, basati su varie tecniche di intelligenza artificiale (e.g. *machine learning*, reti "bayesiane"). Quelli che qualche anno fa erano solo interessanti risultati dei laboratori di ricerca, sono oggi soluzioni già applicate negli stabilimenti industriali più avanzati, con vantaggi per tutta la gestione degli impianti sia in termini di affidabilità, che di disponibilità e sicurezza. Questo non è tutto; stiamo infatti assistendo ad un ulteriore passo in avanti dovuto allo sfruttamento di soluzioni tecnologiche nate principalmente nel mondo della robotica. Negli impianti di processo, le verifiche di integrità richiedono il contatto diretto o ravvicinato alle superfici delle attrezzature da ispezionare. Da alcuni anni sono presenti sul mercato vari sistemi di ispezione con capacità di movimento autonomo per lo svolgimento di ispezioni in punti dove nessun operatore umano, per vari motivi, potrebbe mai arrivare. L'utilizzo di questi sistemi è diffuso in particolare nell'industria di processo (petrolchimica, chimica, oil&gas, ecc.). La ricerca tecnologica in questo settore è davvero molto vivace e, se definire degli standard può essere ancora prematuro, è importante fornire a tutti gli interessati (in particolare gestori, fornitori di servizi, enti di controllo, autorità competenti) una base tecnica comune per guidare scelte e valutazioni e trarre così vantaggio dagli sviluppi della tecnologia. Il lavoro è articolato in 3 sezioni principali, una dedicata al monitoraggio dell'integrità con sensoristica avanzata, una dedicata ai sistemi a movimento autonomi (sempre applicati al monitoraggio dell'integrità), e una dedicata alla valutazione strategica delle tecnologie emergenti. Nell'ultima sezione sono fornite alcune indicazioni concrete, anche in relazione alla pubblicazione di una linea guida UNI sull'argomento.

2. Monitoraggio dell'integrità

Un sistema di monitoraggio generico comprende sensori e componenti o sottosistemi elettronici che forniscono servizi per l'identificazione, la trasmissione e l'elaborazione dei dati. Questi sistemi possono essere utilizzati in molti contesti dell'industria di processo per il monitoraggio di apparecchiature critiche, inclusi recipienti, tubi e macchinari rotanti. I sensori adatti al sistema di monitoraggio devono essere economici, non invasivi, flessibili, scalabili e possibilmente facili da collegare. Queste soluzioni utilizzano tecniche di misura non distruttive già note, con la differenza che vengono rese automatiche e inserite in sistemi che hanno capacità di comunicazione e di elaborazione propria, così che le misure raccolte nel tempo possano essere trasmesse in sala controllo ed utilizzate per gestire integrità e

funzionalità delle attrezzature. Esempi noti sono il monitoraggio delle vibrazioni sulle macchine rotanti e il monitoraggio dello spessore con gli ultrasuoni. Il primo permette di rilevare danni precoci alle parti in movimento che potrebbero portare a guasti. Il secondo è installato in posizione critica lungo tubazioni e recipienti in pressione per monitorare la perdita di materiale dovuta a corrosione o erosione e prevenire rotture. La pratica corrente della maggior parte delle raffinerie e degli impianti petrolchimici prevede già il controllo remoto delle macchine rotanti, attraverso sensori di vibrazione collegati alla sala controllo. In questi stabilimenti, prima dell'adozione di soluzioni automatizzate, venivano consumate molte risorse per controllare ogni macchina una per una e passava molto tempo da un'ispezione all'altra. I vantaggi sono davvero notevoli, i difetti vengono rilevati molto prima e c'è una notevole riduzione del rischio per gli operatori, che non devono più andare in giro a individuare macchine in zone difficili [1].

Nel settore chimico e petrolifero i sistemi di contenimento primari (recipienti e tubazioni) sono soggetti a varie forme di deterioramento (corrosione, erosione, fatica, ecc.) e le conseguenti rotture sono all'origine di molti scenari incidentali, inclusi incendi e rilasci ambientali. Assicurare nel tempo l'integrità delle attrezzature è una priorità nella gestione degli stabilimenti e, per aumentare l'efficienza, alle verifiche eseguite durante le fermate periodiche e ai controlli eseguiti anche con gli impianti in esercizio, da qualche anno si aggiungono anche forme di monitoraggio continuo eseguito con reti di sensori distribuiti nelle posizioni particolarmente critiche ai fini di individuare potenziali rotture. Un esempio significativo è la corrosione sotto isolamento, che è sempre un problema insidioso perché, nella prassi comune, per essere rilevata, richiede la rimozione, almeno parziale, della coibentazione delle tubazioni coinvolte, con notevole impatto sulle attività. L'installazione di sensori ad ultrasuoni sotto il coibente, opportunamente collegati via wireless, permette di monitorare in continuo l'assottigliamento e prevenire le possibili rotture. Le emissioni acustiche costituiscono un'ulteriore tecnica utilizzabile per il monitoraggio delle attrezzature, con particolare riguardo alla rilevazione delle cricche [2].

In sintesi, l'uso combinato di sensoristica distribuita contribuisce in modo significativo a migliorare le prestazioni del sistema di gestione dell'integrità dell'impianto, aumenta l'affidabilità e la disponibilità, riduce il tempo, gli sforzi necessari per l'ispezione e i costi operativi associati, oltre all'esposizione degli operatori ai fattori/agenti associati. I limiti di queste soluzioni è che la numerosità di sensori nei punti critici degli impianti non può crescere oltre un certo numero per vari motivi, incluso il costo relativo dei singoli sensori, il loro ingombro, le difficoltà di installazione su molti tipi di attrezzature, i limiti di affidabilità dei sensori.

3 Sistemi di ispezione con capacità di movimento

Con il crescere della digitalizzazione si è visto che la distribuzione della sensoristica potesse essere la prima via per innervare l'impianto e monitorarne le condizioni di salute; ma non l'unica. Molti punti non possono essere controllati con sensori

permanenti; per molti fenomeni non esiste un singolo punto critico da controllare e per avere una probabilità di rilevamento dei difetti sufficientemente alta, occorrerebbero troppi punti sensibilizzati. Per molte situazioni non è poi necessario avere un monitoraggio continuo, quanto delle misurazioni complete con una periodicità ravvicinata, tanto da assicurare che le condizioni nel tempo non deviano da quelle attese. Per rispondere a queste esigenze la risposta convenzionale è quella di aumentare i controlli non distruttivi in fase di esercizio. Anche per questo ci sono dei limiti dovuti ai costi degli interventi e soprattutto ai rischi per gli operatori che, per compiere le misure richieste, devono accedere ad aree pericolose perché ad es. sono ubicate in alto, o in aree remote o comunque isolate o con condizioni spinte (es. di temperatura o pressione) o ancora in aree confinate o di difficile accesso. Per superare questi limiti sono state sviluppate le tecniche di misura a distanza, con il supporto di sistemi che hanno capacità di movimento in condizioni che per gli operatori umani sarebbero troppo avverse. Questi sistemi sfruttano gli sviluppi recenti nel settore della robotica e dei veicoli terrestri e aerei a guida autonoma, trasferendo queste possibilità alle attività di ispezione.

3.1 Caratteristiche

Quando vi è l'esigenza di avere misure di integrità complete ed affidabili su attrezzature che sono difficili o impossibili da raggiungere da un operatore umano e non ragionevolmente controllabili attraverso reti di sensori permanenti, si apre lo spazio per l'utilizzo di sistemi di misurazione a distanza, cioè di sistemi che riescano a superare le barriere fisiche che si interpongono fra l'operatore e l'oggetto da misurare, attraverso l'utilizzo di sistemi meccanici che possano portare il sensore a contatto con il sistema da misurare. Si tratta di una famiglia abbastanza vasta di sistemi, che però hanno alcune caratteristiche comuni, che di seguito riassumiamo.

3.1.1 Missione

La prima e fondamentale caratteristica è quella di essere sistemi che svolgono una "missione". In altre parole, questi sistemi vengono attivati per un periodo di tempo relativamente breve e devono raggiungere le posizioni richieste ed eseguire tutte le misure necessarie. I sistemi devono concludere la missione senza recare danni al sistema stesso, alla strumentazione trasportata, all'attrezzatura oggetto di misura, ad eventuali persone, macchine, strutture, impianti e altri oggetti presenti lungo percorso.

3.1.2 Movimento

Si tratta di sistemi che hanno all'interno organi che permettono il movimento in un ambiente particolare, che può essere terrestre, aereo o liquido. Il movimento può essere all'esterno o all'interno delle attrezzature, anche in esercizio. A seconda della necessità, i sistemi saranno specializzati per muoversi in ambienti angusti, elevati in quota, remoti o ostili per vari motivi, quali temperature estreme, mancanza di ossigeno o inquinamento. Se il sistema si muove sul terreno, per controllare

dall'esterno le attrezzature si parla di robot o più in generale di veicoli autonomi senza presenza umana. Se si muove in aria, si parla di drone o UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*). Un drone può muoversi all'esterno delle attrezzature o anche all'interno di attrezzature particolarmente grandi, quando queste non sono in esercizio. Lo stesso termine si usa per sistemi che si muovono in mare o in corpi idrici assimilabili per ispezionare dall'esterno le attrezzature, tipicamente gasdotti sottomarini [3]. Vi è poi una grande famiglia di sistemi che si muovono all'interno delle tubazioni o serbatoi in esercizio e controllano le condizioni delle pareti interne. Questa famiglia parte da sistemi di uso comune come i PIG (Pipeline Inspection Gauge), usati da tempo negli oleodotti, per arrivare a robot specializzati per missioni all'interno di impianti più complessi e difficili. I possibili organi di movimento includono ruote, zampe articolati in più segmenti, eliche o altro. I sistemi possono essere distinti in sistemi passivi e attivi. I sistemi passivi vengono trascinati dal flusso e mentre avanzano e ruotano autonomamente, verificando gli spessori delle pareti con sensori ad ultrasuoni. Si tratta di un sistema efficace, ma poco versatile, perché trova molti limiti, inclusi dimensione dei tubi, angoli e raggi di curvatura [4]. I sistemi con movimento autonomo (a bruco) si realizzano con vari segmenti connessi da soffiotti che si gonfiano e sgonfiano. Il sistema a bruco è particolarmente efficace all'interno di tubi stretti e contorti. I sistemi a zampe possono avere al termine eventuali magneti, ventose o ganci in funzione delle esigenze specifiche [5]. Questi sistemi sono in particolare diffusi in sistemi che si arrampicano all'esterno di attrezzature. Caratteristica comune fra droni e robot è che la propulsione di organi di movimento, sia esso arto, ruota o elica, assicurata da un motore indipendente, e fornisce al movimento un grande numero di gradi di libertà.

3.1.3 Controllo del movimento

Il sistema è dotato di sensori più o meno sofisticati che assistono e controllano il movimento. Qui si va dai sistemi più semplici, che hanno a bordo una sensoristica relativamente semplice che avvisa di ostacoli ed interferenze, ma che richiede movimenti telecomandati a distanza da un operatore. A rigore, i sistemi telecomandati non andrebbero inclusi nella categoria dei sistemi a movimento autonomo, ma hanno caratteristiche simili per quanto riguarda meccanica, sensoristica installata a bordo, capacità di raccolta e trasmissione dati e, difatti, possono essere considerati l' "entry level" per i sistemi di misura a distanza. Si va quindi verso sistemi via via più sofisticati, che a bordo hanno una sensoristica adeguata a percepire l'ambiente nel suo complesso e, soprattutto, risorse autonome di calcolo per elaborare i segnali percepiti e muoversi autonomamente nell'ambiente per svolgere la missione assegnata. Essenziale per i sistemi più avanzati è avere a bordo dei software robusti, che siano in grado di adattare il movimento nelle varie situazioni, sfruttando anche le possibilità di apprendimento forniti dall'intelligenza artificiale [6].

3.1.4 Risorse elettriche ed elettroniche ed informatiche

I sistemi descritti hanno poi a bordo uno o più sensori di misura specifica per la valutazione delle condizioni dell'attrezzatura da misurare. La strumentazione di misura a bordo macchina è la ragione d'esistere del sistema. Si può trattare di una semplice video camera per l'esame visivo, o da veri strumenti più avanzati che includono termocamere, spessimetri ad ultrasuoni, misuratori di corrente o di flusso magnetico. Le misure richiedono anche la disponibilità di risorse specifiche per l'acquisizione, la prima elaborazione e la memorizzazione dei dati. In molti casi i dati sono poi esaminati al termine della missione ispettiva, ma può essere necessario, in alcuni casi, anche un sistema di comunicazione per la trasmissione dei dati durante la missione stessa, ove questa ultima sia abbastanza complessa e sia utile avere già un'idea dei primi risultati per decidere sul proseguimento della missione. Per alimentare sensoristica e attuatori di movimento, i sistemi hanno bisogno di energia, che viene fornita da una batteria interna ricaricabile. Meno frequenti sono le alternative di sistemi alimentati via cavo, con pannelli o altri sistemi di raccolta di energia.

3.2 Utilizzo dei sistemi

Lo sviluppo della sensoristica miniaturizzata offre possibilità interessanti per avere strumentazione di ridotto ingombro e peso, installabili anche su robot o droni di dimensioni ridotte e in grado di muoversi su spazi ristretti. Di seguito si riporta un elenco non esaustivo dei tipi di controlli non distruttivi (CND), che possono essere eseguite utilizzando sistemi di ispezione con capacità di movimento autonomo.

3.2.1 Esami visivo e infrarosso

L'esame visivo è il tipo di CND più diffuso e più noto, che ha lo scopo di trovare i difetti presenti sulle superfici interne ed esterne e fornire una valutazione quantitativa su numero e dimensione di tali difetti. La videocamera raccoglie immagini delle superfici da esaminare e può essere installata su qualsiasi sistema, tranne i sistemi che navigano all'interno delle tubazioni piene, dove avrebbe poco senso. I sistemi devono essere dotati di LED o di altri dispositivi di illuminazione, al fine di poter ottenere immagini di elevata qualità. Il riconoscimento, la misurazione ed il conteggio dei difetti nel caso dei sistemi più semplici vengono demandati ad un operatore umano, mentre nei sistemi più avanzati alcune pre-elaborazioni possono già essere fatte a bordo macchina. L'esame a infrarossi è analogo al precedente, con la sola differenza che invece della videocamera a bordo del sistema è installata una termocamera che opera nel campo dell'infrarosso. In questo caso non è necessaria illuminazione.

3.2.2 Spessimetrie

La misura degli spessori con ultrasuoni (UT) è una tecnica ben nota, e consiste nella misurazione del tempo impiegato da un segnale acustico, emesso perpendicolarmente alla superficie, a ritornare indietro riflesso dalla superficie

opposta. Questo è il modo più semplice e diffuso per misurare lo spessore delle lamiere soggette a corrosione. Se la corrosione è uniforme l'efficacia è maggiore, mentre se la corrosione è localizzata nasce il problema di massimizzare la probabilità di intercettare i difetti. A bordo di un sistema con capacità di movimento autonomo sarà presente un sensore UT. Il sistema si muoverà per misurare da un punto di misura all'altro, adottando la strategia di campionamento più efficace per l'oggetto da misurare (e.g. lineare, radiale, ad intervalli variabili)

3.2.3 Altre misure

L' esame a perdita di Flusso Magnetico (MFL) è una tecnica CND, basata sul metodo magnetoscopico (MT), che si applica a materiali ferromagnetici, come alternativa alla misura spessimetrica. Il principio di misura sfrutta le proprietà magnetiche del metallo. Applicando un flusso magnetico su una piccola area, si avrà un assorbimento proporzionale al volume di materiale presente. In corrispondenza di danneggiamenti più estesi si rileva un minore flusso magnetico assorbito. Monitorando le perdite di flusso incontrate sul percorso si ricostruiscono posizione e dimensione dei difetti. La strategia di misura sarà finalizzata a coprire la massima parte della superficie dell'oggetto da misurare.

L'esame a correnti indotte è simile alla precedente. Si usano le correnti indotte generate da una bobina. In presenza di un difetto del materiale, la corrente sarà alterata. Allo stesso tempo ci sarà un effetto sull'impedenza della bobina. Anche in questo caso, monitorando le variazioni di impedenza incontrate sul percorso, si ricostruiscono posizione e dimensione dei difetti.

Si nota che il valore delle misure dipende certo dalla bontà del sensore, ma anche la parte meccanica deve avere caratteristiche di adeguata stabilità per evitare che vibrazioni o scosse possano compromettere la misura e danneggiare la strumentazione stessa.

3.3 Esempi applicativi nell'industria di processo

I sistemi sopra delineati possono servire in varie missioni. In particolare, se ne elencano alcune delle più diffuse e importanti nell'industria di processo.

3.3.1 Misure in quota

Per le misurazioni di punti in quota su superfici interne o esterne, sarebbe necessario montare e smontare ponteggi o attrezzature equivalenti, per consentire all'operatore un accesso in condizioni di sicurezza alle posizioni da ispezionare. Un esempio possono essere le caldaie che devono essere accuratamente ispezionate durante le fermate. Con l'uso di droni che si muovono all'interno si coprono le intere pareti interne. Misure di tipo spessimetrico su colonne di distillazione e torri di raffreddamento, anche in esercizio, vengono fatte efficacemente da robot arrampicatori, che evitano i pericolosi esercizi ai quali erano abituati gli operatori. I robot arrampicatori sono dotati di quattro o più arti meccanici indipendenti, dotati di dispositivi di adesione. I dispositivi di adesione possono essere di tipo meccanico,

magnetico o pneumatico. In particolare, esistono configurazioni che, combinando articolazione e pinze di presa, emulano le tecniche di arrampicata del mondo animale (p.es. gatto, gecko). Elementi essenziali sono i dispositivi di visione tridimensionale, con relativo software di elaborazione immagini, che permettono di individuare ostacoli e trovare il percorso più sicuro. I robot arrampicatori sono ideali anche per l'interno di grandi serbatoi, forni e caldaie, naturalmente solo durante le fermate [7].

Le torce sono un sistema essenziale per la sicurezza degli impianti di processo e sono soggetti a varie forme di deterioramento, incluse corrosione e cricche che possono causare interruzioni di servizio con conseguenze gravi. Le ispezioni sono sempre state problematiche, sia per la difficoltà di accesso, sia per l'altezza, che per la temperatura molto elevata, che si mantiene per alcuni giorni anche dopo lo spegnimento. Per le torce, che sono in aree relativamente libere, è efficace l'utilizzo di droni, che montano videocamere ad alta risoluzione e permettono un esame visuale molto dettagliato, mantenendo l'operatore in posizione di sicurezza [8]. Anche i camini sono soggetti a forme di deterioramento dovute alla temperatura e alla composizione chimica, e sono bene ispezionabili con droni. Al di fuori del settore petrolifero e chimico, l'uso di droni sta diventando una pratica consolidata per la gestione delle pale eoliche e dei parchi fotovoltaici. La sorveglianza con i droni ottiene il doppio fine di scoprire in anticipo forme di incipiente deterioramento e di scoraggiare azioni maligne contro le installazioni stesse [9].

3.3.2 Misure interne

Misurazioni con PIG all'interno di oleodotti sono eseguite regolarmente per prevenire possibili rilasci ambientali. In termine gergale, gli oleodotti ispezionabili con PIG vengono detti "piggabili". Di solito lo sono i maggiori oleodotti che connettono terminali, depositi e raffinerie. Per linee più complicate, per varie curve in sequenza o diametri ridotti, bisogna ricorrere a sistemi dotati di organi di movimento evoluti, quali ruote, cingoli o zampe. Aderendo alle pareti interne essi raggiungono anche tubazioni più piccole e articolate. Per la massima versatilità esistono anche robot vermiformi, che possono muoversi in tubazioni a forte curvatura.

Per i fondi dei serbatoi atmosferici, la verifica di integrità può essere fatta agevolmente con sistemi che vengono calati attraverso aperture sul tetto all'interno del serbatoio in esercizio. Essendo dotati di sistemi misura UT o MFL, possono monitorare i fenomeni di corrosione del fondo. In fase di esercizio, queste misure si sono dimostrate molto più affidabili delle emissioni acustiche normalmente usate [10].

3.3.3 Misure in ambienti difficili e remoti.

Sotto questa voce si includono le misurazioni sulle attrezzature poste in aree d'impianto così congestionate e anguste da non essere raggiungibili da un operatore che trasporti la strumentazione convenzionale. Sono anche comprese le misurazioni all'interno di ambienti confinati o sospetti di inquinamento, per le quali sarebbe

necessario, ai fini di garantire all'operatore un accesso in condizioni di sicurezza alle posizioni da ispezionare, adottare le specifiche e costose misure tecniche ed organizzative di cui al d.p.r. 177/2011.

La sorveglianza esterna su gasdotti e oleodotti è un'altra attività onerosa per gli operatori, per le grandi distanze in gioco e i normali ostacoli degli ambienti naturali. Anche qui i droni sono preziosi per rilevazione possibili perdite o altri danneggiamenti esterni [11]. La sorveglianza con i droni è anche un deterrente per i malintenzionati, che sono spesso attratti dai prodotti petroliferi.

4 Valutazione Strategica

4.1 Punti di forza

Nelle attuali pratiche di sorveglianza dell'integrità, si può adottare l'efficace combinazione di controlli non distruttivi con operatori umani, per le aree facilmente raggiungibili, e ispezioni con sistemi mobili per le aree più difficili da raggiungere. In entrambi i casi la frequenza dei controlli sarà maggiore per gli elementi tecnici critici in base alla significatività ai fini incidentali e alle condizioni rilevate nelle verifiche eseguite durante le fermate. Per alcuni sistemi di contenimento particolarmente critici, si considererà la possibilità di monitoraggio continuo, ove applicabile. Per molti sistemi dinamici, il monitoraggio continuo delle vibrazioni è preferibile alle forme di controllo saltuario, anche in termini economici.

4.2 Punti di debolezza

4.2.1 Interferenza

Per tutti i sistemi di misura autonomi il problema delle interferenze è davvero critico. Per i sistemi terrestri sono di solito presenti sistemi di blocco che impediscono al robot di recare danno a cose o persone. La medesima cosa è più complessa per i droni, che dovrebbero essere azionati su aree non troppo congestionate e possibilmente privi di oggetti poco visibili, come le linee elettriche. Ad ogni buon conto si ricorda che l'utilizzo di droni è soggetto alla normativa sulla navigazione aerea, con una serie crescente di obblighi e autorizzazioni in funzione delle potenze e delle dimensioni dei sistemi.

4.2.2 Il problema delle aree ATEX

La formazione di atmosfere potenzialmente esplosive è un pericolo presente in molte aree interne agli stabilimenti chimici e petroliferi. Per i sistemi in movimento questa può essere una limitazione importante. Per quanto riguarda i droni, di fatto non esiste la possibilità di avere sistemi compatibili con la normativa ATEX. È quindi essenziale che siano usati in ambienti aperti e lontani da punti di emissione di vapori infiammabili, così da escludere anche la più remota possibilità di presenza di atmosfere esplosive. Nel caso di uso di droni in ambienti interni, come caldaie e forni, il loro uso è possibile solo previa bonifica certificata (*gas free*) dell'ambiente.

4.3 Opportunità

4.3.1 Gestione e Prognostica

Per avere una gestione efficace dell'integrità degli impianti, i vari sensori distribuiti nell'impianto devono essere collegati tra loro così da avere una rete adeguata a sensibilizzare le attrezzature più critiche degli impianti. Ciò consente di rilevare difetti minori molto prima che si verifichino danni, guasti o incidenti. Per farlo è fondamentale avere una perfetta identificazione degli elementi critici, attraverso un sistema di "smart tagging" collegato ad un data base che contenga tutti i dati storici dell'attrezzatura, inclusi costruzione, guasti e riparazioni. Un sistema di "smart tag" faciliterà l'aggiornamento del data base in occasioni di controlli, verifiche, guasti e anomalie. L'integrazione delle misure fatte dai sistemi mobili con l'identificazione degli elementi d'impianto consentirà di aggiornare immediatamente il database non appena la missione ispettiva sarà terminata. Allo stesso modo anche le ispezioni fatte da operatore umano saranno all'istante riversate nel data base. Per avere una risposta completa ed efficace è indispensabile disporre anche di un software che possa unire le misura proveniente in continuo dai sensori, e le informazioni provenienti dal data base degli elementi critici, in modo da avere una prognostica della condizione di "salute" degli elementi critici e garantire il prolungamento in sicurezza della vita degli impianti, anche oltre i limiti definiti in base riferimenti di letteratura o a previsioni aprioristiche. Il software dovrebbe includere una piattaforma per la comunicazione, un database e un'interfaccia utente [12]. Il modulo prognostico può utilizzare algoritmi più o meno sofisticati per prevedere l'evoluzione dell'impianto, in modo da supportare il funzionamento, l'ispezione e la manutenzione. Se inizialmente si usavano algoritmi predittivi di tipo deterministico, oggi si preferiscono algoritmi più sofisticati, quali le reti "bayesiane", che consentono di adattare continuamente le probabilità di guasto in base alla numerosità di dati ricevuti. Ulteriori elementi di adattabilità si potranno ottenere sfruttando le potenzialità del machine learning e di altre tecniche di Intelligenza artificiale [13].

4.3.2 Gemelli Digitali

Da ultimo, la numerosità dei dati rilevati con il monitoraggio e con le misure mobili, unita alla forza della prognostica di cui §4.3.1, danno la possibilità di sviluppare i cosiddetti gemelli digitali degli impianti, modelli che combinano le rappresentazioni statiche tipiche dei sistemi CAD di progettazione assistita con i dati raccolti nel tempo, così che si possano simulare anche condizioni future. Questo dà grandi possibilità ai fini della gestione dell'esercizio dell'impianto. Ad esempio, si possono simulare future condizioni di esercizio, inclusi parametri operativi, materie prime e prodotti e vedere l'effetto che potrebbero avere sulle condizioni future dell'impianto e sul relativo tempo di vita delle attrezzature [14]. Questo sulla base delle conoscenze a priori, integrate ed aggiornate da una miriade di dati reali raccolti in precedenza, permettendo di fare sempre le scelte giuste per assicurare disponibilità, affidabilità e sicurezza.

4.3.3 Realtà aumentata e Realtà virtuale

Questi modelli digitali possono avere un uso più immediato ed efficace con i sistemi di realtà aumentata, che consentono, ad esempio, di passeggiare nell'impianto reale vedendo sovrapposte su un occhiale apposito (smart glass) le reali condizioni presenti e future, moltiplicando così le potenzialità delle attività ispettive convenzionali. Particolarmente interessante è anche la combinazione fra i dati acquisiti con le misure mobili all'interno di zone inaccessibili e il modello digitale basato sul CAD dell'attrezzatura stessa [15]. In questo caso serve più la realtà virtuale che, attraverso il visore che esclude il mondo esterno, permette di immergersi all'interno dell'attrezzatura stessa rendendo visibili le effettive condizioni rilevate [16].

4.3.4 Sicurezza del lavoro

Ultima, ma non per importanza, va considerata la sicurezza del lavoro. Gli operatori responsabili dei controlli sono oggi esposti a molti pericoli, fra cui il lavoro in quota, l'accesso ad ambienti confinati o sospetti di inquinamento e l'esposizione ad estremi termici. Con lo sviluppo delle varie forme di ispezione a distanza, senza nulla perdere della loro competenza, gli operatori possono svolgere il lavoro in situazioni maggiormente protette.

4.4 Criticità

È importante che il gestore abbia un quadro completo dell'intero asset, fissi i criteri di disponibilità dell'impianto, affidabilità e continuità delle operazioni, in un quadro di complessiva sicurezza. Su questa base dovrà capire per quali sistemi siano sufficienti i controlli che si fanno in occasione di fermate periodiche, e quali necessitino di controlli più o meno ravvicinati anche in esercizio. Allo stesso modo dovrà capire dove occorra investire su un relativamente costoso sistema fisso di monitoraggio, piuttosto che su misure più o meno ravvicinate con sistemi mobili, probabilmente più economiche. L'investimento su sensoristica e strumentazione deve essere accompagnato da investimenti sul software, inclusa la prognostica, che è essenziale per trasformare i dati in conoscenze e indirizzare così tutta la gestione. Se non riesce a trovare un equilibrio fra tutto questo, il gestore rischia di ottenere dagli investimenti fatti dei risultati minori delle aspettative.

Un'ulteriore criticità è costituita dalle autorità e enti di controllo che non avessero avuto modo di aggiornarsi sulla rapida evoluzione delle tecnologie di controllo e non ne tenessero conto in fase di valutazione, in particolare ai fini del controllo del pericolo di incidente rilevante. In ambiti regolamentati, ad esempio i CND per cui è richiesto necessariamente un operatore qualificato secondo i livelli UNI EN ISO 9712 [17], ancora non sono accettati in situazioni ordinarie, se effettuati da remoto, in quanto non esiste ad oggi una regolamentazione specifica, che occorre certamente incentivare.

5. Conclusioni

Per rispondere alla crescita esponenziale dei sistemi di misura a distanza, il Comitato Termotecnico Italiano – CTI (ente federato UNI) ha visto la necessità di predisporre una linea guida, che verrà presto pubblicata, e consentirà ai gestori di fare scelte efficaci in questo campo e adottare i sistemi più appropriati, evitando quegli errori dei quali si è discusso al §4.4. La linea guida sarà utile anche ai costruttori e integratori di sistemi, che saranno più confidenti nel proporre i sistemi stessi ai gestori. Inoltre, gli enti di controllo avranno uno strumento condiviso per comprendere il miglioramento delle condizioni di sicurezza indotto da queste nuove soluzioni, tenendone adeguatamente conto nei vari passaggi previsti dalle normative sulla sicurezza, inclusi autorizzazione, deroghe, raccomandazioni e prescrizioni, in maniera flessibile in funzione delle condizioni, ad es. considerandoli a supporto delle soluzioni tradizionali.

Per trasferire i risultati della ricerca alla prassi industriale, il ruolo della normazione è essenziale [18]. In una fase iniziale la linea guida può giocare un ruolo essenziale per guidare e indirizzare il mercato, senza però imbrigliarlo troppo in regole rigide che potrebbero essere superate in poco tempo. Con il supporto di un documento ufficiale, infatti, le aziende più prudenti saranno incoraggiate e le autorità ed enti di controllo potranno superare remore e diffidenze, di ostacolo per lo sviluppo delle tecnologie.

Bibliografia

- [1] Bragatto, P., & Ansaldi, S. M. (2022). Cyber physical systems for occupational safety at industrial sites: opportunities and challenges. *Serbian Journal of Management*, 17(2), 451-461.
- [2] Bragatto, P., Ansaldi, S.M., Mennuti, C. (2018) Improving safety of process plants, through smart systems for critical equipment monitoring *Chemical Engineering Transactions*, 67, 49-54.
- [3] Yu, L., Yang, E., Ren, P., Luo, C., Dobie, G., Gu, D., Yan, X. Inspection robots in oil and gas industry: A review of current solutions and future trends (2019) ICAC 2019 - 2019 25th IEEE International Conference on Automation and Computing, art. no. 8895089
- [4] Shukla, A., & Karki, H. (2016). Application of robotics in onshore oil and gas industry—A review Part I. *Robotics and Autonomous Systems*, 75, 490-507.
- [5] Van Den Bos, B., Mallion, A., Wilson, C., Zwicker, E., Schler, A., Black, T. (2015) Robotic inspection solutions for petrochemical pressure vessels. *Society of Petroleum Engineers - Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference, ADIPEC 2015*
- [6] Devold, H., Fjellheim, R. Artificial intelligence in autonomous operation of oil and gas facilities (2019) *Society of Petroleum Engineers - Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference, ADIP 2019*

- [7] Sudevan, V., Shukla, A., Karki, H. (2018) Inspection of vertical structures in oil and gas industry: A review of current scenario and future trends SEG/AAPG/EAGE/SPE Research and Development Petroleum Conference and Exhibition, RDP 2018, 65-68.
- [8] Sabry, H. (2017). Integrity of LNG flare systems. Society of Petroleum Engineers (SPE). In Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference, Abu Dhabi, UAE. Paper# SPE-188307-MS.
- [9] Kumar, N. M., Sudhakar, K., Samykano, M., & Jayaseelan, V. (2018). On the technologies empowering drones for intelligent monitoring of solar photovoltaic power plants. Paper presented at the Procedia Computer Science, 133 585-593.
- [10] Anvo, R., Sattar, T. P., Gan, T. H., & Pinson, I. (2018). Non-destructive testing robots (NDTBOTs) for In-service storage tank inspection. In Human-Centric Robotics: Proceedings of CLAWAR 2017: 20th International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines (pp. 301-308).
- [11] Jordan, S., Moore, J., Hovet, S., Box, J., Perry, J., Kirsche, K., Lewis, D., Tse, Z.T.H. (2018) State-of-the-art technologies for UAV inspections IET Radar, Sonar and Navigation, 12, 151-164.
- [12] Bragatto, P., Agnello, P., Mennuti, C., & Milazzo, M. F. (2020). Online Condition Monitoring: Sensors, Models and Software for a Safe Management of Aged Process Plants. In Computer Aided Chemical Engineering 48, 1753-1758.
- [13] Ali, A., Maley, K., Li, S., Owaid, A.A., Shehhi, A.A. Roadmap for Digitalized Asset Integrity Management System (2021) Society of Petroleum Engineers - Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference, ADIP 2021,
- [14] Anderson, S., & Barvik, S. (2020). Advanced Offshore Digital Inspection Methods. In International Petroleum Technology Conference (p. D013S008R003). IPTC.
- [15] Ancione, G., Saitta, R., Bragatto, P., Fiumara, G., & Milazzo, M. F. (2022). An Advanced System for the Visualisation and Prediction of Equipment Ageing. Sustainability, 14(10), 6156.
- [16] Augugliaro, G., Balistreri, R., Giacobbe, F., & Pichini, E. (2020). Inail procedure for augmented reality remote survey. Paper presented at the Proceedings of the 30th European Safety and Reliability Conference and the 15th Probabilistic Safety Assessment and Management Conference, 1792-1798.
- [17] ISO 9712:2021 Non-destructive testing — Qualification and certification of NDT personnel. – International Organization for Standardization; Geneva CH.
- [18] European Commission, Directorate-General for Research and Innovation, Radauer, A., Baronowski, S., Yeghyan, M., et al., Scoping study for supporting the development of a code of practice for researchers on standardisation: final report, Tardos, G.(editor), Publications Office of the European Union, 2022, <https://data.europa.eu/doi/10.2777/567608>

De-energizzazione smart negli impianti di processo: l'esempio Eni

L. Di Donato¹, A. Ferraro¹, D. Freda¹, M. Pirozzi¹, L. Ricciardi¹, M. Venafro²

¹Inail - Dit

²Eni S.p.A.

Abstract

L'evoluzione dei processi produttivi sta comportando una minore presenza del lavoratore in prossimità di impianti e attrezzature nel loro utilizzo durante le fasi di produzione. Tuttavia, non sempre si può prescindere dalla presenza dei lavoratori per le attività di manutenzione, regolazione e pulizia e durante tali attività i lavoratori possono essere esposti a rischi elevati anche se macchine e impianti sono in fermo manutentivo e pertanto de-energizzati. Le suddette attività sono spesso affidate a soggetti esterni specializzati che devono essere opportunamente edotti relativamente alle sequenze di operazioni da effettuare per non inficiare la sicurezza dei lavoratori e preservare l'integrità dell'impianto. Le azioni da effettuare risultano ancor più critiche per quegli item dell'impianto collocati nelle aree in cui si trovano ad operare più addetti, afferenti anche a diverse squadre di manutenzione. Le fasi dell'attività di manutenzione, pulizia o altro a cui bisogna prestare particolare attenzione sono quelle di de-energizzazione delle fonti di energia pericolose e di intercettazione dei fluidi, e la loro riattivazione post-intervento. Il rilascio di energia residua accumulata e non dissipata, nonché la proiezione accidentale di sostanze possono comportare gravi rischi di infortunio, anche mortale. L'implementazione di una corretta procedura di LoTo (*lockout/tagout*) è un importante riferimento per gestire i pericoli derivanti dal riavvio accidentale di macchine, attrezzature o insiemi, prevenendo anche il rilascio/proiezione non previsto di fluidi/solidi.

Il presente documento descrive i benefici derivanti dall'integrazione di una procedura di de-energizzazione in una sezione di impianto di processo e come questa possa essere implementata con l'adozione di tecnologie innovative quali ad esempio Internet of Things (IoT), sistemi di comunicazione smart, o altro.

Keywords: de-energizzazione, lockout/tagout, manutenzione.

1. Introduzione

La crescente robotizzazione delle aziende e l'adozione di tecnologie innovative hanno condotto all'introduzione di un numero sempre maggiore di macchine e attrezzature di lavoro che sono in grado di operare in maniera autonoma. Questo grado di automazione porta a ipotizzare una riduzione sostanziale degli infortuni dei

lavoratori, non essendo in molte circostanze, più indispensabile una loro presenza ravvicinata a parti di macchine e a sostanze pericolose durante le fasi della produzione.

In realtà, questa diminuzione degli infortuni attesa, non sempre si concretizza e non emerge dai dati generali sugli infortuni perché continuano a sussistere attività estremamente delicate dal punto di vista della sicurezza per le quali l'azione del lavoratore in prossimità dell'attrezzatura di lavoro risulta assolutamente necessaria, se non essenziale per la sicurezza e la continuità del servizio.

Queste sono in genere:

- la regolazione;
- la manutenzione con possibile installazione di opere provvisoria;
- l'ispezione;
- la pulizia;
- il controllo.

In particolare, per effettuare in sicurezza le operazioni su attrezzature e macchine è necessario che i punti di regolazione e manutenzione siano, per quanto possibile, situati lontano da zone e punti pericolosi e che le attività siano realizzate a macchina/impianto fermi¹; Se per motivi tecnici non è possibile soddisfare una delle precedenti condizioni, devono essere prese disposizioni per garantire che dette attività possano essere eseguite in condizioni di sicurezza. Questo ovviamente impone delle scelte ponderate da parte del datore di lavoro, essendo fuori dalle sue competenze la costruzione dell'attrezzatura di lavoro, disciplinata dalle direttive di prodotto (come PED o Macchine), ma nella sua responsabilità la messa a disposizione di tali attrezzature ai lavoratori che dovranno poi utilizzarla o mantenerla, nel rispetto del d.lgs.81/08 e della normativa specifica per le verifiche periodiche delle attrezzature (d.m. 11 aprile 2011)

Per le attrezzature in generale si devono disconnettere tutte le fonti di energia e intercettare tutti i fluidi presenti negli apparecchi e nelle tubazioni che afferiscono alla parte di impianto interessata dall'intervento o che in qualche modo possano influenzare o invadere (gas, fluidi, vapori) la zona di lavoro.² Per i macchinari è necessario evitare che vi siano contatti con organi in movimento o parti in tensione e che si creino situazioni in cui vi è accumulo di energie residue non opportunamente scaricate. Per quanto riguarda i fluidi, bisogna escludere l'esposizione dei lavoratori a sostanze pericolose per proprie specifiche caratteristiche (tipologia), o perché in pressione e a temperature estreme. Infatti, il rilascio di materiali e sostanze o meglio la riattivazione non intenzionale o inattesa di fonti di energia sui luoghi di lavoro è causa di incidenti e infortuni gravi e mortali. Un ulteriore fattore di rischio da

¹Requisito previsto, in relazione agli interventi di manutenzione, dal RES 1.6.1 "Manutenzione della macchina" della direttiva 2006/42/CE.

² Requisito previsto, in relazione agli interventi di manutenzione, dal RES 1.6.3 "Isolamento delle fonti di energia" della direttiva 2006/42/CE.

considerare è quello correlato alla possibilità che le operazioni di manutenzione siano effettuate da personale di ditte esterne specializzate che possono operare da sole o insieme al personale interno.

È ovvio che le azioni di miglioramento dovrebbero in primis essere finalizzate a impedire o ridurre la necessità dell'intervento del lavoratore per le attività di cui all'elenco sopra, auspicabilmente aumentando la performance della macchina o attrezzatura³ o sostituendo l'uomo nello svolgimento di tali attività; tuttavia, ciò non è né semplice né sempre possibile. Pertanto, affinché ad una diminuzione dei "malfunzionamenti" si associ una concreta diminuzione del numero di infortuni, dette attività dovrebbero essere realizzate sulla base di istruzioni e procedure operative chiare e tecnicamente e tecnologicamente innovative quali, ad esempio:

- procedure di accesso e abilitazione dei lavoratori addetti (di cui al paragrafo 2),
- soluzioni smart/Industry 4.0 per il rilevamento e il controllo delle grandezze fisiche, dei parametri di lavorazione o della posizione dei lavoratori (paragrafo 4).

Proprio al fine di bloccare le fonti di energia pericolose che possono provocare riavvi non previsti di parti e componenti di macchine e apparecchi, nonché per evitare il rilascio inatteso di sostanze, gas, vapori e per tutte quelle operazioni da effettuare comunque ad impianto de-energizzato, ovvero isolato dalle fonti di energia pericolose, è stata ideata una procedura denominata "procedura LoTo (Lockout/Tagout)".

Le misure previste dalla procedura sono volte a proteggere i lavoratori dai pericoli connessi a tutte le fonti di energia presenti in una attrezzatura di lavoro o di un impianto ad esempio:

- elettrica,
- meccanica,
- pneumatica,
- idraulica,
- chimica,
- gravitazionale,
- termica.

2. La procedura LoTo

La procedura LoTo, standardizzata dall'OSHA (<https://www.osha.gov/control-hazardous-energy/standards>) fornisce le modalità applicative e i criteri da seguire finalizzati a:

- identificare le fonti di energia pericolose;

³ La direttiva 2006/42/CE, in relazione agli interventi di manutenzione, al RES 1.6.4. "Intervento dell'operatore" prevede testualmente: "La macchina deve essere progettata, costruita ed equipaggiata in modo tale da limitare la necessità d'intervento degli operatori. L'intervento di un operatore, ogniqualvolta non possa essere evitato, dovrà poter essere effettuato facilmente e in condizioni di sicurezza."

- isolare e/o dissipare tali energie (de-energizzazione);
- effettuare il *tryout* (verifica strumentale dell'avvenuta de-energizzazione);
- procedere all'arresto e al successivo riavvio di un macchinario/impianto in condizioni di sicurezza per i diversi lavoratori.
- identificare i lavoratori autorizzati, anche con qualifica ai sensi del DPR 177/2011
"Regolamento recante norme per la qualificazione delle imprese e dei lavoratori autonomi operanti in ambienti sospetti di inquinamento o confinanti, a norma dell'articolo 6, comma 8, lettera g), del decreto legislativo 9 aprile 2008, n. 81.", se operano all'interno di ambienti confinati e/o sospetti di inquinamento.

La procedura LoTo è finalizzata all'interruzione e alla dissipazione delle fonti di energia pericolose, impedendo il riavvio accidentale e inatteso nelle fasi di manutenzione delle macchine o degli impianti, ed è caratterizzata da cinque elementi fondamentali:

- istruzioni: contengono le procedure specifiche per ogni macchina/attrezzatura finalizzate a operare in condizione di energia zero, ovvero nessuna energia attiva o accumulata per la specifica attività da eseguire; ciò comporta la preliminare identificazione di tutti i punti di controllo dell'energia;
- formazione: è la fase di *training* del personale interessato e autorizzato alle procedure LoTo;
- politiche: prevedono le linee di indirizzo per attivare e rendere operative le procedure;
- dispositivi: sono idonei dispositivi di *lockout e tagout*, appositamente ideati per eseguire il bloccaggio e l'etichettatura;
- auditing: attività necessaria per identificare le fonti di energia pericolose delle macchine/impianti e per evidenziare eventuali interventi necessari per poter applicare correttamente la procedura di lock-out.

La corretta applicazione della procedura risulta dunque condizionata da numerosi fattori, quali le tecnologie disponibili, la possibilità di avere sempre disponibile personale formato, la comunicazione della procedura al personale e altro.

Sono coinvolti nell'applicazione della procedura, compresa la fase di *training*, tutti i lavoratori, dipendenti interni all'azienda e delle ditte appaltanti che partecipano all'attività manutentiva o di cui all'elenco nel capitolo introduttivo. Generalmente si distingue tra lavoratori autorizzati, lavoratori interessati e altri lavoratori. Si deve inoltre tener conto che, se fosse necessario l'accesso in ambienti confinati e/o sospetti di inquinamento (serbatoi, silos, tubazioni ad esempio), per i lavoratori impiegati deve essere effettuato un controllo dell'idoneità alla mansione specifica e, di conseguenza, l'accertamento per questi della qualificazione ai sensi del DPR

177/2011. La procedura va applicata ogniqualvolta un lavoratore può essere esposto a fonti o rilasci di energia e materia pericolosi, indipendentemente dal numero di lavoratori che hanno accesso alla specifica macchina o all'impianto interessati dall'intervento.

I dispositivi ideati e utilizzati per il *lockout* o bloccaggio e per l'etichettatura possono agire sia sulla parte di macchina o impianto interessata dal blocco dell'energia meccanica, idraulica o pneumatica pericolosa (blocchi per volantini, valvole a sfera, valvole a farfalla, valvole di bombole e altre tipologie di intercettazioni per fluidi) e sia sull'impianto elettrico (blocchi per interruttori, sezionatori, portafusibili, salvamotore etc.) per l'isolamento dell'energia elettrica.

Dovrà sempre essere applicata la regola del *One Lock/One Key* per evitare che nel caso di più lavoratori uno solo abbia il controllo del lock attraverso la chiave e possa *dimenticarsi* di altri lavoratori ancora impegnati in attività sull'impianto. Nel caso in cui i suddetti blocchi standardizzati non risultino di agevole impiego, si possono utilizzare dei blocchi cosiddetti "universali", perlopiù a cavo adattabili a diverse situazioni impiantistiche senza mai derogare, però, alla regola imposta del periodo precedente.



Figura 1. Esempi di dispositivi per il lockout e il tagout

In linea con i dettami della procedura LoTo e in relazione ai requisiti dei mezzi incorporati in una macchina o attrezzatura destinati ad impedire il suo avviamento inatteso o di parti di essa in modo che gli interventi umani nelle zone pericolose possano aver luogo in sicurezza, la norma UNI EN ISO 14118:2018 fornisce diverse utili indicazioni. Partendo dalla considerazione che oggi l'automazione ha reso la relazione tra "in funzione" e "in movimento" e tra "ferma" e "a riposo" più difficili da definire aumentando la probabilità di avviamento inatteso in macchine fermate per

attività diagnostiche o azioni correttive, la norma, tra le diverse misure generali, riporta la possibilità che il fabbricante della attrezzatura inserisca nel manuale d'istruzioni, e/o nelle avvertenze della stessa, proprio le procedure da seguire comprese quelle per la dissipazione di energia o il trattenimento (contenimento) e il metodo di verifica. La stessa norma rimarca l'utilizzo di dispositivi per l'isolamento delle fonti di energia che devono

- assicurare una disconnessione o separazione affidabile dalla fonte di energia;
- avere un collegamento meccanico affidabile tra il comando manuale e l'elemento (gli elementi) di isolamento;
- essere dotati di una chiara identificazione dello stato del dispositivo di isolamento che corrisponda a ciascuna posizione del suo comando (attuatore).

Riguardo i dispositivi di bloccaggio dei dispositivi d'isolamento nella posizione di isolamento, la norma prevede le seguenti possibilità:

- mezzi per l'applicazione di uno o più lucchetti;
- dispositivi di interblocco a trasferimento a chiave dove una delle serrature è associata al comando manuale (attuatore) del dispositivo di isolamento;
- l'utilizzo di una o più chiavi personali che sono rilasciate da un dispositivo di blocco delle chiavi interbloccato e trattenuta/e da una o più persone per prevenire un avviamento inatteso e un conseguente eventuale evento pericoloso;
- coperchi o involucri bloccabili.

La stessa norma prende in considerazione anche i dispositivi di dissipazione dell'energia (e relativi mezzi di bloccaggio e fissaggio) che devono essere forniti quando vi è la presenza di energia immagazzinata che possa generare un pericolo.

Di particolare rilievo sono le indicazioni relative alle misure per mantenere il comando di arresto specificando requisiti specifici per:

- i comandi di arresto ad effetto mantenuto generato da un dispositivo di comando di arresto (progettato in primis in modo che i comandi di arresto abbiano la precedenza sui comandi di avviamento);
- i comandi di arresto ad effetto mantenuto generato dal comando della macchina;
- le disconnessioni meccaniche;
- il bloccaggio delle parti mobili.

Infine, la norma richiama anche la necessità che la macchina e i dispositivi di isolamento e trattenuta dell'energia siano progettati, scelti e disposti in modo da permettere una verifica efficace dell'isolamento e della dissipazione dell'energie in gioco e riporta le disposizioni per ottenere un'adeguata verifica.

3. Caso applicativo

Al fine di rendere sempre più rigoroso il monitoraggio delle attività in campo, Eni ha sviluppato internamente (a partire dal 2014) un applicativo chiamato e-WP (Electronic Work Permit), accessibile tramite intranet/internet, nato per supportare il processo relativo ai Permessi di Lavoro in tutte le fasi, dal rilascio alla chiusura, con lo scopo di:

- Aumentare il controllo ed il monitoraggio di tutte le regole da applicare nel processo di emissione di un Permesso di Lavoro;
- Prevenire le interferenze tra diversi team di manutenzione che lavorano in una stessa area;
- Digitalizzare la documentazione, semplificandone l'archiviazione e il recupero;

e-WP è attualmente implementato e utilizzato in oltre 100 siti operativi in Italia e all'estero.

La compilazione manuale dei fogli di carta comporta un processo con molti rischi come firme mancanti, perdita di certificati e/o allegati e successive "revisioni" che portano ad un processo indebolito e non completamente monitorato, con perdita di controllo su possibili near miss o incidenti.

La digitalizzazione del Permesso di Lavoro consente a qualsiasi sito di velocizzarne il processo diffondendo la stessa procedura a tutti i soggetti coinvolti, evitando scorciatoie o azioni potenzialmente pericolose che avrebbero un impatto negativo sulla sicurezza degli operatori.

Tra le funzionalità oggi disponibili all'interno della piattaforma e-WP emergono l'interfaccia con il SAP, la possibilità di geolocalizzare i permessi, l'informatizzazione dei documenti di supporto al Permesso di Lavoro, l'archiviazione dei permessi (inclusa la dematerializzazione, la firma grafometrica e la conservazione sostitutiva) e la possibilità di collegare più Permessi di Lavoro o i Permessi di Lavoro ad altri documenti informatizzati (con relazione tipo "fine-inizio").

Attualmente sono in corso importanti attività evolutive, come il rilascio di una versione mobile della piattaforma che permette agli operatori di remotizzare alcuni degli step del processo garantendo una gestione più rapida ed efficace dei processi di gestione dei Permessi di Lavoro.

All'interno del tool sono stati inoltre sviluppati i cosiddetti "certificati" (collegati ai permessi di lavoro e dotati di flussi di approvazioni propri) che non sono altro che moduli complementari («add-on») atti a monitorare specifiche attività. I certificati attualmente in uso in Eni sono i seguenti:

- Certificato di manovra elettrica (Lo/To);
- Isolamento meccanico;
- Piping and Instrumentation Diagram (P&ID);
- Spazi Confinati;
- Presa in carico ponteggi;
- Radiografie industriali;

- Gas check;
- Controlli non distruttivi;
- Audit.

Eni, mediante specifiche procedure interne, definisce in maniera puntuale le attività, i ruoli e le responsabilità dei soggetti coinvolti in attività su sistemi energizzati, con lo scopo di proteggere i lavoratori durante le operazioni di manutenzione su macchine ed apparecchiature. Eni ha quindi sviluppato un flusso approvativo digitale, in coerenza con le procedure aziendali di cui sopra, che riproduce le attività, i ruoli e le responsabilità dei soggetti coinvolti nei sistemi energizzati, con lo scopo di proteggerli durante le operazioni di manutenzione.

Come detto, il sistema LoTo (Lockout/Tagout) è necessario ogni volta che si effettua un intervento di manutenzione in prossimità di una macchina o apparecchiatura che potrebbe causare lesione dovute ad:

- un avvio imprevisto dell'attrezzatura;
- un rilascio imprevisto di energia, che può essere elettrica, idraulica, pneumatica, meccanica, chimica, termica o immagazzinata (o potenziale).

I certificati di isolamento non sono quindi documenti indipendenti, ma devono essere utilizzati e conservati insieme al Permesso di Lavoro secondo le modalità previste dalla procedura aziendale.

In conclusione, il permesso di lavoro elettronico, mediante questo certificato, riesce a gestire in maniera più rigorosa il flusso da seguire per l'esecuzione di una procedura Lo/To, per il monitoraggio dell'isolamento energetico e il ripristino in condizioni sicurezza dell'impianto o dell'apparecchiatura.

4. Implementazioni di soluzioni smart

Per la corretta applicazione delle procedure previste (es. la procedura LoTo) e lo svolgimento in sicurezza di attività di manutenzione, Inail sta studiando e sperimentando le potenzialità tecnologiche e le criticità derivanti dall'impiego di tecnologie innovative, quali ad esempio quelle annoverate nel piano Industria 4.0, per supportare i lavoratori nell'esecuzione della procedura LoTo.

La realizzazione di una piattaforma di controllo degli apparecchi e dell'impianto ormai è una realtà diffusissima, soprattutto per aspetti gestionali ed autorizzativi. Più complessa, ma notevolmente più efficace, risulta essere la messa a disposizione dei lavoratori di un *digital twin* di impianto aggiornato con lo stato della macchina.

L'esecuzione della procedura LoTo, essendo spesso integrata anche da aspetti gestionali aziendali (permessi di lavoro, controllo delle qualifiche, o altro), trarrebbe il massimo beneficio dall'integrazione delle informazioni tecniche e gestionali.

Il *digital twin* di un impianto, o anche del singolo apparecchio, può essere realizzato con diversi livelli di accuratezza che dovrebbero essere scelti in funzione della valutazione dei rischi, tenendo conto delle limitazioni tecnologiche quale ad esempio la disponibilità di copertura di rete o di altre tecnologie wireless che consentono la comunicazione di dati dall'impianto alla piattaforma e viceversa.

Ad esempio, laddove possibile, l'utilizzo di dispositivi wireless applicati su valvole, interruttori o lucchetti consente il controllo, anche a distanza, e l'esecuzione dell'avvenuta de-energizzazione delle fonti di energia pericolose per la specifica attività di manutenzione da eseguire.

L'uso di dispositivi fisici indossabili dai lavoratori che si interfacciano, tramite una connessione in rete, con quelli presenti sulle apparecchiature e/o parti di macchine e impianti, e se del caso anche tra loro, può consentire una supervisione in tempo reale dello stato delle stesse e consente di tracciare la posizione dei lavoratori all'interno di un impianto. In particolare, questo approccio può supportare gli interventi effettuati da diverse squadre di lavoro, interne o esterne, in zone limitrofe evitando le sovrapposizioni e soprattutto l'esposizione a rischi per la presenza di energie pericolose (residue e non) di altri operatori estranei a tali attività.

La ricerca di cui al programma di ricerca scientifica Inail 2018_2021 e al successivo programma 2021-2024, utilizza i risultati del progetto di ricerca denominato "Senergy" realizzato mediante il Bric (bando per il finanziamento di ricerche in collaborazione) n° 40 del 2019 e implementa l'uso di una sensoristica di tipo smart ed in particolare quella relativa ai dispositivi di tipo "wearable" nel contesto delle operazioni di manutenzione di macchine e impianti e attrezzature a pressione "gestite" con una procedura LoTo. Infatti, l'applicazione della procedura, utilizzando ausili wearable mediante i quali, ad esempio, visualizzare i dati significativi ai fini dell'attività espletata, ha sicuramente un valore aggiunto in termini di immediatezza e completezza delle informazioni. Tale aspetto è ancor più rilevante in quelle situazioni (impianti di certe dimensioni e insiemi di macchine e apparecchiature) dove nelle operazioni di manutenzione e/o di service operano più tecnici e anche di ditte diverse contemporaneamente.

Il sistema individuato, progettato e testato utilizzando un prototipo di attrezzatura a sicurezza aumentata si basa sui seguenti elementi:

- 1) tag-rfid passivi a frequenza ultra alta allocati sugli indumenti di lavoro o i DPI che devono indossare i lavoratori (in particolare quelli addetti alla manutenzione);
- 2) un sistema di localizzazione basato sulla tecnologia UHF-RFID costituito fondamentalmente da un'antenna reader e da uno specifico software per il tracking; il sistema, grazie al movimento dell'antenna e al software dedicato all'individuazione dell'area dove si trova l'operatore e alla comunicazione al cloud server Back-end, permette di determinare la posizione in tempo reale dei lavoratori che indossano i tag UHF-RFID;
- 3) un'applicazione Android su dispositivo mobile utilizzata dall'operatore per mandare/ricevere informazioni e conferme riguardo al processo di de/re-energizzazione;
- 4) Tag NFC posizionati in corrispondenza dei punti dove i lavoratori devono eseguire i task della procedura di de-energizzazione. I lavoratori leggono i tag NFC ed informano il sistema cloud server Back-end riguardo alla loro posizione, poi

ricevono la conferma sul loro corretto posizionamento per lo specifico step della procedura;

5) un software cloud server Back-end basato sul framework di Spring on java che di fatto è il cuore logico del sistema smart per la gestione della de-energizzazione poiché coordina le comunicazioni tra le varie parti del sistema smart e registra ogni informazione sulla procedura di de-energizzazione in uno specifico database;

6) un server cloud Front-end sviluppato sulla piattaforma Angular che funziona da interfaccia tra il sistema e il supervisore della manutenzione.

7) macchine, attrezzature e attrezzature a pressione facenti parte di un impianto che possono interagire con il cloud server Back-end per ricevere comandi e fornire feedback riguardo il loro stato di funzionamento al lavoratore di manutenzione tramite l'applicazione dedicata installata sul dispositivo mobile utilizzato dal lavoratore.

8) un selettore modale smart per la manutenzione aggiuntivo al selettore modale standard nel rispetto del punto 1.2.5 "Selezione dei modi di controllo o di funzionamento" dell'Allegato I della Direttiva Macchine 2006/42/CE;

9) un modulo Modbus TCP/IP che consente l'interazione tra il server cloud Back-end e il sistema di controllo delle macchine e delle attrezzature a pressione di un impianto.



Figura 2. Sistema smart per la de-energizzazione di un impianto

5. Conclusioni

Da quanto sopra, l'applicazione di una procedura LoTo risulta assolutamente essenziale, procedura che purtroppo è spesso disattesa con il risultato di incidenti che possono coinvolgere anche più lavoratori. Non dimentichiamo infatti che in particolare per impianti di grandi dimensioni ed estesi su grandi superfici diventa

complesso tenere sotto controllo la presenza di più lavoratori o addirittura di squadre diverse di lavoratori. Se introduciamo anche la complessità dovuta alle lavorazioni in ambienti confinati e/o sospetti di inquinamento ci si rende conto che se le procedure correlate alle attività di manutenzione vengono disattese la possibilità di un incidente con un infortunio diventano altamente probabili. Le tecnologie smart possono sicuramente essere di aiuto nelle fasi di gestione degli aspetti lavorativi soprattutto quando tendono, anche con la digitalizzazione di documenti, a dare informazioni immediatamente disponibili relative:

- alle attività che devono essere eseguite per poter effettuare la manutenzione sicura di attrezzature e impianti;
- ai parametri di lavoro delle attrezzature di lavoro (che siano compatibili con la sicurezza per l'attività da svolgere);
- alla disponibilità dei DPI adeguati al lavoro da svolgere dei lavoratori;
- alla presenza in corrispondenza dell'attrezzatura di lavoro o impianto oggetto di attività manutentive dei lavoratori esclusivamente *autorizzati allo svolgimento della mansione*.

Gli strumenti più comunemente utilizzati sono device quali tablet, smartphone e hololens o comunque sistemi di Augmented Reality (AR) o Virtual Reality (VR) che possono essere forniti ai lavoratori sul campo e che consentono loro di essere in contatto con la stanza di controllo remoto in modo da chiedere, ricevere e fornire informazioni relativamente alle attività da svolgere da remoto.

Inail, ed in particolare il laboratorio "*Sicurezza degli Impianti di Trasformazione e Produzione*", in considerazione dei risultati già raggiunti e delle attività in corso, si propone anche nel prossimo futuro quale soggetto promotore ed esecutore per lo sviluppo di progetti di ricerca e studi in collaborazione con Università, Competent Center e altri soggetti Istituzionali e non con la finalità di implementare l'uso delle nuove tecnologie e degli strumenti di IoT per migliorare le attività di manutenzione anche eseguite seguendo procedure standardizzate.

6. Bibliografia

- [1] OSHA "The Control of Hazardous Energy (Lockout/Tagout)", Section 1910.147, 1989.
- [2] De Santis P. "Il rischio di infortunio da avviamento inatteso come fonte di gravi infortuni: la procedura di lockout-tagout raccomandata Dall'OSHA", 2004.
- [3] SUVA "Avviamento inatteso di macchine e impianti", codice: 67075.i, 2015.
- [4] Di Donato, L., Tomassini, L., Ferraro, A., Piegari, G., Capelli, P., Lugli, S., Maiocchi, B., Delussu, N., Ficcadenti, T., Rizzati, M., Muni, A., "Il defeating di un dispositivo di interblocco associato ai ripari. Norma EN ISO 14119:2013. Caso studio", Inail, dicembre 2016. ISBN 978-88-7484-519-4.
- [5] Vignali, G., Bottani, E., Guareschi, N., Di Donato, L., Ferraro, A., Pirozzi, M., Tomassini, L., Longo, F., "Development of a 4.0 industry application for increasing occupational safety: tests on aseptic filling line", ICE2019 Conference, 2019.

Sistemi di rivestimento per l'ottimizzazione della durabilità e dell'efficientamento energetico di scambiatori di calore

L. Comel¹, R. Grassetti²

¹Project manager, G.M.A. srl

²CEO, G.M.A. srl

Abstract

Gli scambiatori di calore a fascio tubiero sono componenti critiche all'interno degli impianti industriali, e dal loro corretto funzionamento dipende l'affidabilità e l'efficienza di tutto il ciclo produttivo. In funzione delle condizioni di processo possono essere adottate delle soluzioni integrate volte ad ottimizzare la durabilità e l'efficienza di scambiatori di calore sia di nuova costruzione che già in servizio.

Nel corso degli anni sono stati sviluppati approcci per consentire la risoluzione, sia in ottica preventiva che correttiva, di problematiche corrosive ed erosive, consentendo l'ottimizzazione delle scelte metallurgiche ed il prolungamento della vita utile del manufatto.

In seguito, nella prospettiva dell'efficientamento energetico, si è approfondita l'analisi dell'effetto benefico del coating in termini di riduzione dei fenomeni di adesione di depositi sulle superfici interne dei tubi.

A tal riguardo sono state svolte sperimentazioni in collaborazione con alcuni partner industriali ed è attualmente in corso di svolgimento uno studio sperimentale volto alla caratterizzazione delle proprietà antifouling di diverse tipologie di rivestimenti.

Le soluzioni proposte sono coperte da brevetti industriali e sono state oggetto di svariate applicazioni negli ultimi 30 anni nel trattamento di scambiatori di calore nei siti industriali di alcuni tra i maggiori player internazionali nel settore oil&gas.

Keywords: scambiatori di calore, rivestimenti, efficienza, anticorrosione, fouling, asset integrity.

1. Introduzione

Anni di ricerca e applicazioni reali nel campo dei rivestimenti anticorrosivi per la prevenzione ed il controllo dei fenomeni corrosivi ed erosivi di componenti di impianto ed in particolare di condensatori e scambiatori di calore, hanno portato allo sviluppo di tecnologie brevettate per il rivestimento in alto spessore delle piastre dei fasci tubieri, il rivestimento delle casse d'acqua ed il rivestimento delle superfici interne dei tubi, che può essere applicata sia sui tratti di ingresso/uscita utilizzando una speciale pistola a spruzzo, o su tutta la lunghezza mediante una macchina di verniciatura semiautomatica.

1.1 Corrosione negli scambiatori di calore

Gli scambiatori sono continuamente esposti, dal lato refrigerante, ad un ambiente aggressivo e soggetto a fenomeni di fouling, per la presenza, ad esempio, di cloruri, solfuri, sabbia e fango. Lo sporcamento, in particolare, aumenta la resistenza allo scambio termico, diminuendo il rendimento dell'apparecchiatura, rendendo necessari frequenti trattamenti di lavaggio chimico o idrodinamico e innescando processi corrosivi sotto deposito.

I fasci tubieri degli scambiatori di calore sono realizzati, in funzione delle condizioni di esercizio, in materiali diversi, che spaziano dall'acciaio carbonio, alle leghe di rame, all'acciaio inox, fino al titanio. Le problematiche che possono derivare da una non corretta applicazione della metallurgia sono molteplici e possono andare da una corrosione generalizzata, a forature in tempi rapidi, a fenomeni erosivi, con conseguenti effetti negativi sull'esercizio dell'impianto.

Nel caso, ad esempio, della foratura anche di un solo tubo del condensatore di vapore a servizio della turbina di una centrale elettrica ed impiego di acqua mare, la presenza di cloruri lato vapore richiede azioni tempestive che possono comportare la fermata non pianificata dell'impianto.

Qualora invece si verifichi una foratura microscopica in un tubo di condensatore a servizio di gruppo frigorifero, si genera la perdita di grandi quantità di gas refrigerante e consecutivo fuori servizio dell'impianto.

Nelle seguenti immagini vengono presentati alcuni casi a nostro avviso significativi osservati negli anni.



Figura 1. Fenomeni erosivi legati a sovravelocità in combinazione con particolato in sospensione in tubi in Al-brass



Figura 2. Foratura per sovravelocità in tubi in rame di condensatore di gruppo frigorifero. Si noti come la presenza del frammento di materiale plastico (proveniente da torre evaporativa) bloccato nella spirale del tubo è stato la causa della problematica

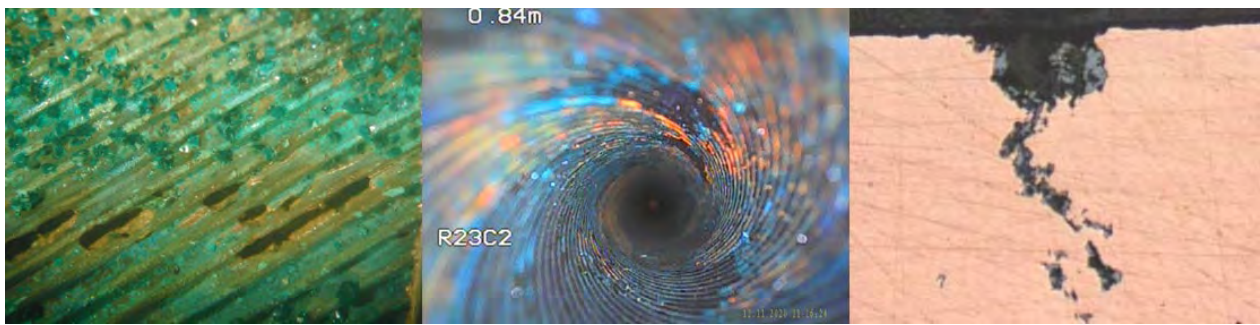


Figura 3. Corrosione localizzata (ant-nest) in tubi in rame di gruppo frigorifero. Fenomeno di difficile diagnosi anche con strumentazione avanzata per CND



Figura 4. Fenomeni erosivi su tubi in Cu-Ni per la presenza di sabbia in sospensione nell'acqua di raffreddamento

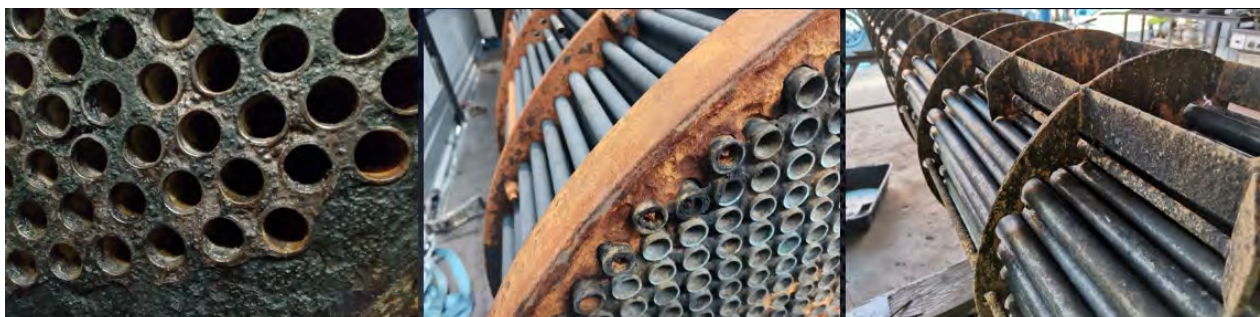


Figura 5. Fenomeni legati all'interazione galvanica tra tubi e piastre tubiere realizzati con materiali con diverso potenziale di elettronegatività

2. Metodi

2.1 Tecnologie per il rivestimento degli scambiatori di calore

Nel corso degli anni sono state individuate soluzioni in grado di rispondere alle problematiche lato dei tubi, prevenendo i danni causati da sporco, corrosione, erosione e cavitazione, mediante l'applicazione di resine di natura epossidica o epossifenolica sulle superfici delle piastre tubiere, interno tubi e casse acqua degli scambiatori di calore o condensatori.

Con l'opportuna valutazione delle resine è possibile l'impiego sia per l'utilizzo nel circuito acqua di raffreddamento (anche nel caso di bonifiche degli scambiatori con vapore) ma anche in presenza di sostanze chimiche aggressive, fino ad una temperatura massima di esercizio di 180°C.

Tra le tecnologie sviluppate, degno di menzione è il sistema brevettato semiautomatico per la verniciatura su piena lunghezza di tubi di fasci tubieri, con diametri a partire da 13 mm, utilizzabile per interventi sia in stabilimento che nei siti dei committenti.

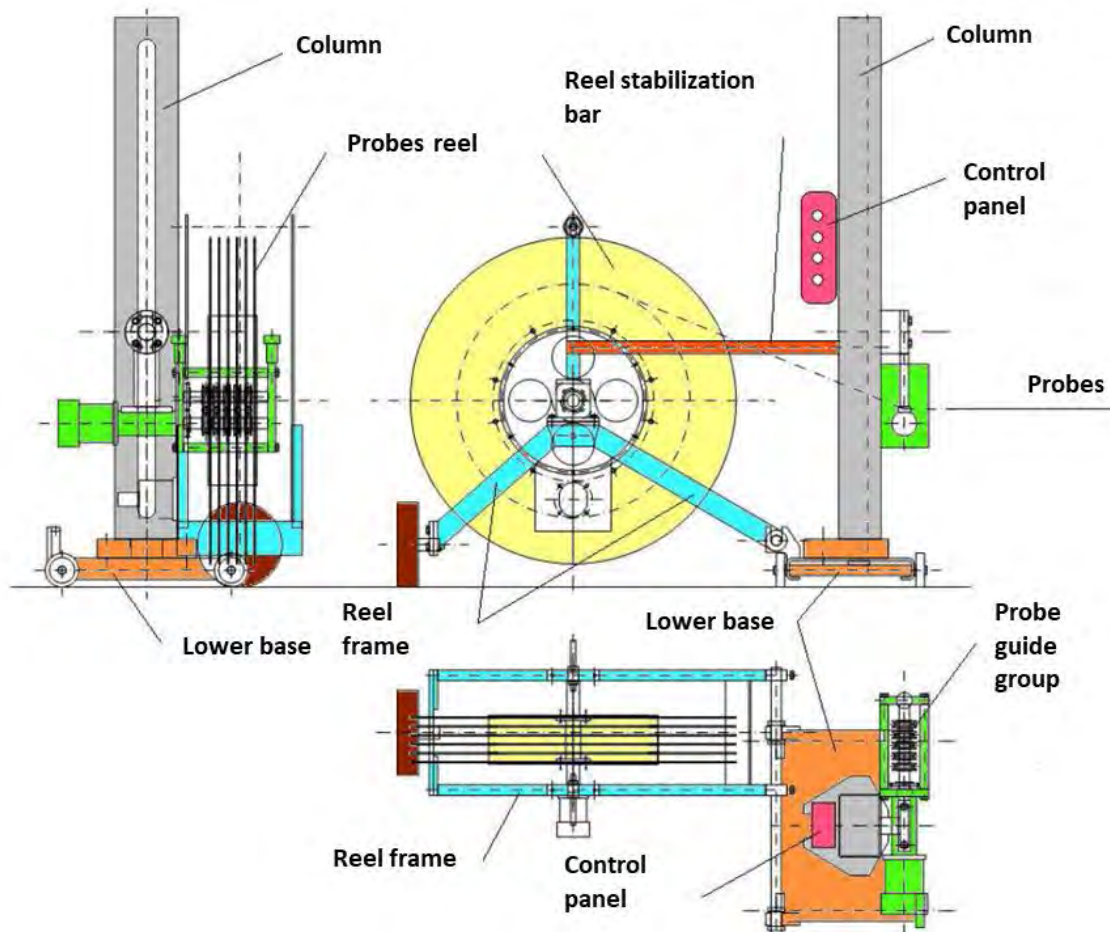


Fig. 6. Disegno costruttivo della macchina semi-automatica di verniciatura interna dei tubi dei fasci tubieri.

La macchina semi-automatica di verniciatura è costituita da cinque sonde mobili che vengono inserite all'interno dei tubi; le sonde, tramite un ugello radiale, spruzzano con tecnica misto aria in modo uniforme il prodotto verniciante su tutta la superficie interna del tubo con uno spessore di circa 50 micron a passata.

2.2 Studi di efficacia e durabilità

Sono stati svolti nel tempo vari test di durabilità presso laboratori accreditati, includendo prove di immersione in varie soluzioni e nebbia salina fino a 2000 ore. In particolare, sono state effettuate sulle varie formulazioni di materiali, applicati su campioni di varie metallurgie, delle prove di immersione a lungo termine in acqua dolce ed acqua salmastra secondo ISO 2812.

Ulteriori test sono stati svolti secondo ISO9227 per verificare la resistenza del materiale alla nebbia salina fino a 2000 ore.

Detti test vengono periodicamente ripetuti, al fine di confermare la resistenza dei materiali a seguito di variazioni composizionali (legate, ad esempio, a requisiti normativi su base europea) oppure nel caso di formulazione di nuovi materiali prima della loro immissione nei cicli di verniciatura.

Sono stati inoltre svolti test di laboratorio e sul campo finalizzati a verificare l'influenza dell'applicazione del rivestimento sullo scambio termico del fascio tubiero, in particolare in riferimento all'applicazione su piena lunghezza dei tubi.

Le applicazioni sul campo vengono periodicamente monitorate, consentendo di realizzare uno storico riguardante la durabilità dei rivestimenti nelle varie condizioni di esercizio.

2.3 Effetto in termini di anti-fouling

Nel corso degli ultimi anni, nell'ottica dell'efficientamento energetico è aumentata in maniera sensibile la richiesta dei committenti di individuare delle soluzioni atte a ridurre l'adesione di depositi sulle pareti interne dei tubi, al fine di limitare o annullare la necessità di impattanti interventi di pulizia.

Il fouling è una questione piuttosto complessa da studiare in quanto non esistono metodologie di prova standardizzate per misurare l'influenza che esercita sulla prestazione energetica di uno scambiatore: risulta quindi essenziale studiare i meccanismi di formazione dei depositi biologici sui rivestimenti per valutare in maniera scientifica le caratteristiche di resistenza all'incrostazione dei coating.

Sono stati svolti in collaborazione con un importante partner internazionale degli studi sperimentali su tubazioni in Cu-Ni e acciaio inox inserite in un simulacro di prova volto a ricreare le condizioni di fouling presenti nei loro impianti industriali alimentati da acqua di fiume.

G.M.A. ha recentemente ricevuto un contributo su Fondo POR FESR 2021-2027 per la realizzazione del progetto CLEAN - Coating Life Extension for ANticorrosive applications, che verte sui seguenti argomenti: approfondimento delle proprietà antifouling e di scambio termico del sistema Phencote per il rivestimento di scambiatori di calore, ottimizzazione del sistema di applicazione, analisi LCA del processo e creazione dei relativi standard. Le fasi della ricerca si avvalgono della collaborazione del Dipartimento di Ingegneria e Architettura dell'Università degli Studi di Trieste e della MaterialScan S.r.l.

Sulla base di questo progetto è attualmente in corso di svolgimento uno studio sperimentale volto alla valutazione dell'effetto di varie tipologie di rivestimento su tubi in inox, Cu-Ni e ottone con circolazione di acqua mare. In parallelo vengono svolti approfonditi studi di caratterizzazione superficiale dei materiali, rivestiti e non.

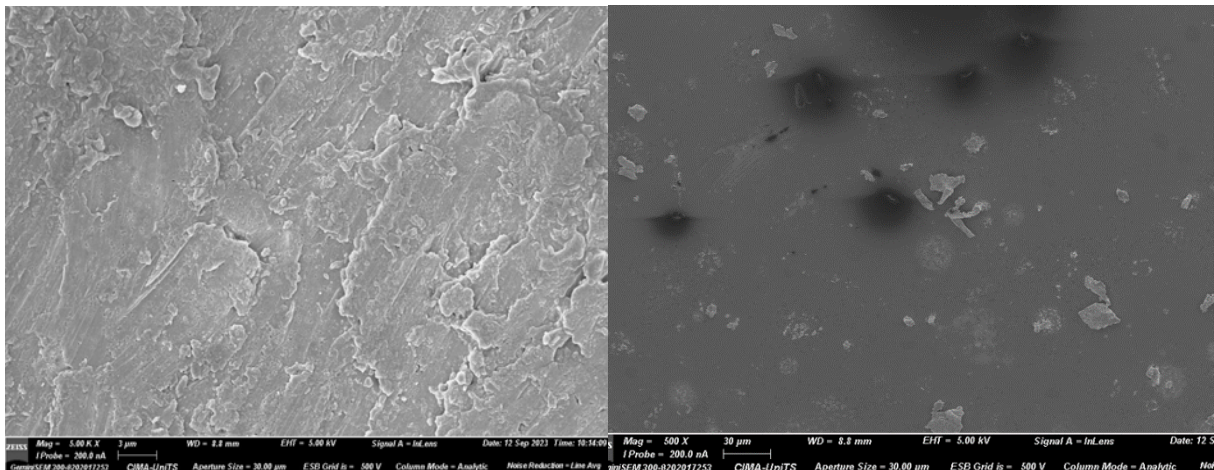


Figura 7. Confronto al microscopio a scansione elettronica tra campione non rivestito in Cu-Ni e tubo con rivestimento epossidico



Figura 8. Setup di prova per la simulazione del flusso di acqua mare a confronto in tubi rivestiti e non

3. Risultati

3.1 Test di laboratorio

I test sperimentali di caratterizzazione dei materiali mostrano il mantenimento di ottimali caratteristiche di resistenza nel tempo, con mantenimento di elevati valori di adesione al substrato, sia esso in acciaio carbonio che in leghe di rame.



Figura 9. Test di adesione ISO4624 su campioni in acciaio carbonio rivestiti in HR60TL a 200 micron per simulare il ciclo impiegato nel rivestimento di scambiatori di calore. Condizionamento a 2000 ore mediante nebbia salina. Si osservi la non propagazione della corrosione a partire dall'intaglio ed il distacco adesivo del funghetto dal rivestimento a carichi elevati.

Le analisi morfologiche e strumentali sulla superficie dei materiali sono volte a verificare il possibile ruolo del rivestimento in termini di riduzione dell'effetto del fouling.

I risultati preliminari dell'indagine mostrano in generale una sensibile riduzione della rugosità per la presenza del rivestimento rispetto al metallo nudo, oltre ad una netta diminuzione della bagnabilità, in particolare rispetto ad acciaio inox e Al-brass. La stessa morfologia superficiale, nella verifica al microscopio elettronico, consente di apprezzare la maggiore uniformità delle superfici in presenza del rivestimento.

I test di condizionamento in acqua di fiume a lungo termine (fino a 28 settimane) mostrano un rilevante effetto benefico del coating nell'adesione di depositi carbonatici

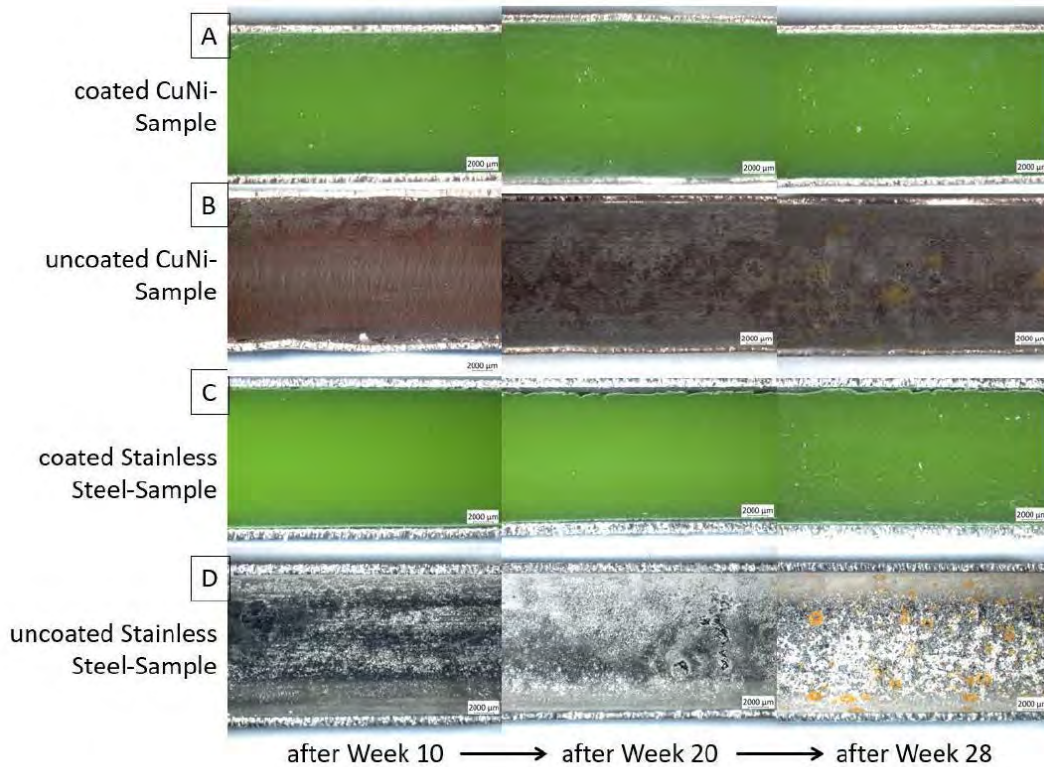


Figura 10. Confronto visivo nel tempo tra le tipologie di tubi rivestiti e non

Per quanto riguarda la formazione di film biologico, il conteggio di cellule sui tubi in inox mostra valori superiori fino a 60 volte nei tubi non rivestiti rispetto a quelli con rivestimento.

| Test duration [weeks] | Total cell counts (1.000/cm ²) | | | | | | | | |
|-----------------------|--|-----|-----|-----------|-----|-----|-------------|-------|-------|
| | A-1 | A-3 | A-5 | C-1 | C-3 | C-5 | D-1 | D-3 | D-5 |
| 10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 97 | 54 | 5.500 | 5.600 | 5.900 |
| 20 | 36 | 36 | 60 | 86 | 220 | 140 | 2.400 | 3.200 | 2.600 |
| 28 | 14 | 130 | 48 | 280 | 230 | 270 | 3.300 | 2.900 | 1.300 |
| | Coated CuNi | | | Coated SS | | | Uncoated SS | | |

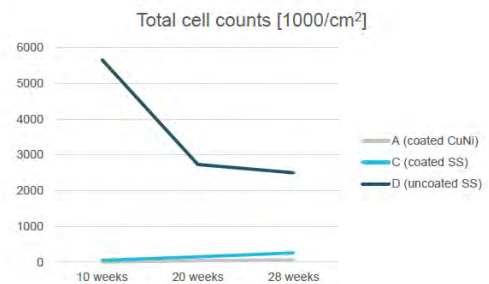


Figura 11. Valutazione nel tempo del conteggio delle cellule biologiche sulle varie tipologie di tubi

3.2 Case study

3.2.1 Scambiatori raffineria

Nel 2013 sono stati rivestiti presso 8 fasci tubieri di nuova costruzione, destinati all'installazione presso un sito Oil&Gas in Libia. Nei precedenti esercizi, i fasci tubieri, realizzati in acciaio carbonio e non rivestiti mostravano già sul breve-medio

termine importanti problematiche sia di natura corrosiva che di sporcamento, inficiando in maniera significativa l'efficienza dell'impianto.

In sinergia con la committenza viene messo in atto un ciclo di rivestimento, che prevede l'applicazione di un rivestimento epossidico su piena lunghezza all'interno dei tubi, completato da un coating in alto spessore (3 mm) sulle piastre tubiere, atto a proteggere l'interfaccia tubo/piastra.

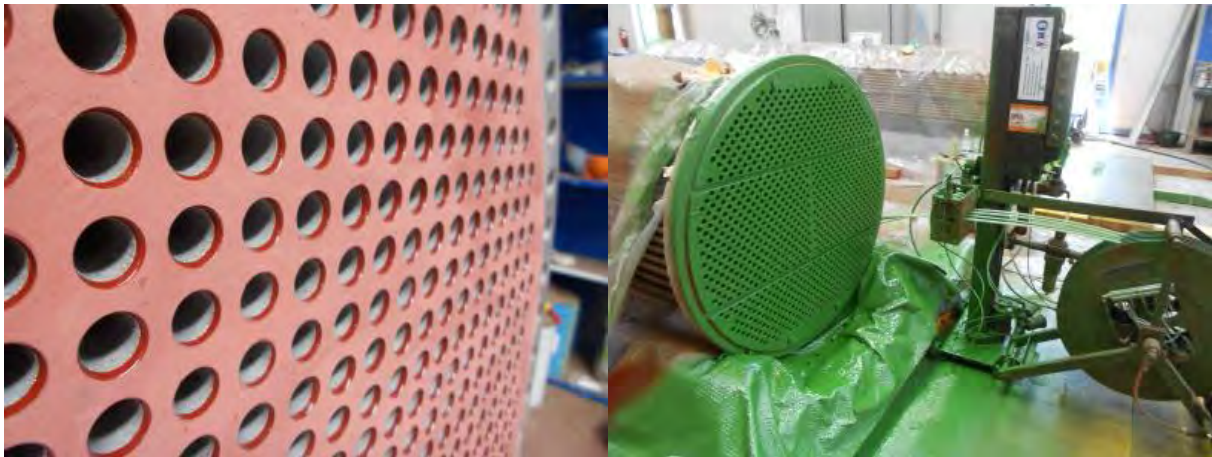


Figura 12. Fasi di applicazione del rivestimento

A distanza di 4 anni dalla messa in servizio gli scambiatori vengono aperti e soggetti ad un controllo visivo ed endoscopico. Viene inoltre fatta una valutazione comparativa tra i fasci tubieri rivestiti e fasci di analoga costruzione e medesimo servizio, privi però di rivestimento. Il report, emesso dalla committenza, evidenzia la grande differenza a livello di presenza di prodotti di corrosione e depositi a favore dei fasci rivestiti, con il coating che appare perfettamente conservato.



Figura 13. Osservazione visiva ed endoscopica di un fascio tubiero rivestito

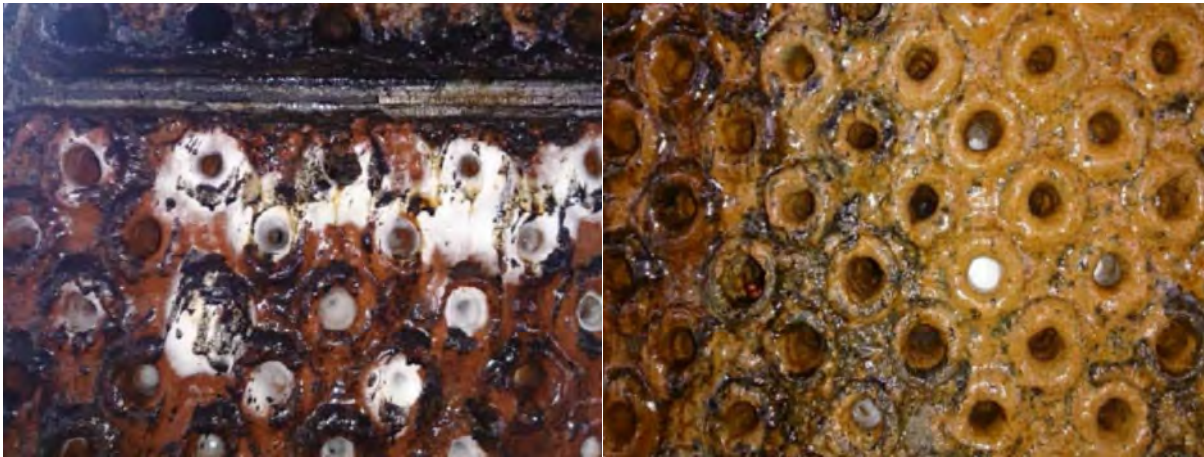


Figura 14. Fascio non rivestito nelle medesime condizioni di servizio

4. Conclusioni

L'utilizzo di sistemi di rivestimento epossidici ed epossifenolici su scambiatori di calore è una soluzione consolidata che consente di incrementare le prestazioni e la durata delle componenti, grazie all'effetto anticorrosivo ed alla possibilità di ottimizzare le scelte metallurgiche ed ovviare ad eventuali problematiche di esercizio o errori di progettazione. Meno noto, ma di primario interesse nell'ottica dell'efficientamento energetico e della riduzione degli interventi manutentivi è l'effetto benefico del coating a livello di adesione di depositi alle pareti dei tubi, siano essi di natura organica (biofouling) o inorganica (tipicamente carbonati). Sono stati svolti studi sperimentali che hanno consentito di misurare questo effetto, confermato dall'esperienza sul campo nel rivestimento di fasci tubieri per i settori power e oil&gas.

È inoltre in corso di svolgimento uno studio, cofinanziato da Fondo POR FESR 2021-2027, volto ad approfondire le dinamiche alla base dell'effetto di antifouling e di efficientamento energetico relativo all'applicazione di sistemi di rivestimento su fasci tubieri.

5. Bibliografia

- [1] R. Grassetti, S. Doria Protection of heat exchangers by means of coating their internal surface. CORROSION ITALIA 2003, Taormina, Italia
- [2] R. Grassetti, S. Doria Ottenere l'efficienza dello scambio termico degli scambiatori a fascio tubiero", *Manutenzione, Tecnica e Management*, 6/2000, 51-54
- [3] L. Comel, R. Grassetti Atti della Conferenza su "Protezione e ripristino anticorrosivo di scambiatori di calore e condensatori in centrali elettriche, raffinerie ed impianti petrolchimici" SAFAP. Milano, 16/11/2016
- [4] L. Comel, A. Vanacore Atti della conferenza su "Corrosion in refinery and petrochemistry" EFC WP15 spring meeting. Lille, 30/03/2023
- [5] L. Comel Atti della conferenza su « revêtements (coating) utilisés pour protéger les échangeurs contre la corrosion » CEFACOR Parigi 21.10.2021

La Conduzione dei generatori di vapore: tra realtà e realtà aumentata

G. Giannelli¹, G. Grillone², N. Altamura³, V. Nastasi², A. Muratore¹

¹ Inail - Uot di Como

² Inail - Uot di Palermo

³ Inail - Uot di Bari

Abstract

La conduzione dei generatori di vapore è un aspetto vitale per la sicurezza di queste attrezzature che affonda le radici nella storia industriale del nostro Paese. L'evoluzione dei moderni generatori offre al conduttore un ampio ventaglio di ausili che rendono la conduzione più simile ad una sorveglianza che ad una vera e propria conduzione. L'adozione di accessori di controllo e sicurezza sempre più sofisticati ha consentito di alleggerire di molto il carico di lavoro del conduttore; su questa linea la normazione si è mossa per recepire la spinta all'automazione dei controlli di esercizio, seguendo la traccia della conduzione senza assistenza continua e consentendo l'assistenza a cadenze definite (24, 48 e 72 ore). Su questa linea si muovono, ad esempio, le specifiche tecniche del Comitato Termotecnico Italiano designate UNI/TS 11325-3:2021 e UNI/TS 11325-10:2018 fornendo le indicazioni tecniche per la conduzione senza assistenza continua.

Ciononostante il ruolo del conduttore resta comunque importante, sia nella sorveglianza periodica del generatore sia nella conduzione diretta in caso di situazioni transitorie (avviamento e arresto) o di anomalie dei sistemi (es. accessori di regolazione).

In tale contesto assume un'importanza primaria la formazione del futuro conduttore, sia attraverso la realizzazione di spazi attrezzati dei dispositivi essenziali all'esercizio del generatore, sia attraverso la realizzazione di simulatori che forniscano (anche attraverso sistemi a realtà virtuale o aumentata) strumenti di addestramento realistici.

Scopo di questo lavoro è, dunque, analizzare le condizioni, le metodologie utili a tradurre in pratica i percorsi formativi per gli aspiranti conduttori.

Keywords: generatori di vapore, sicurezza sul lavoro, conduzione, abilitazione, attrezzature a pressione.

1. Introduzione

I moderni generatori di vapore sono dotati di numerosi dispositivi che agevolano e sostituiscono, almeno per archi temporali definiti, i conduttori.

L'evoluzione tecnologica ha fatto sì che la conduzione si sia sempre più indirizzata verso una sorveglianza del generatore (UNI TS 11325-3 e UNI TS 11325-10), piuttosto che una conduzione puntuale.

L'introduzione di accessori in grado di monitorare tutti i parametri fondamentali ai fini di un corretto esercizio del generatore (livello, pressione, qualità dell'acqua), integrati da software di gestione del generatore, hanno consentito l'introduzione di una conduzione in modalità non continua, in Italia limitata alle 72 ore.

In ogni caso, però, il ruolo del conduttore continua a rivestire un importante elemento di sicurezza (vale la pena ricordare che, esclusi i casi previsti nell'allegato III del D.M. n° 94 del 07/08/2020 punto 1.1 per i quali viene concesso l'esonero secondo le modalità previste al punto 2 del medesimo Decreto Ministeriale e i casi previsti al punto 2.2 del medesimo Decreto Ministeriale, i generatori devono essere condotti da conduttore abilitato ai sensi del D.M. n° 94 del 07/08/2020 con il pertinente grado di abilitazione, indipendentemente dalla modalità continua o discontinua di conduzione prevista dal fabbricante) in quanto il conduttore è in grado di fronteggiare situazioni di transitorio e situazioni di emergenza e di poter prevenire eventi critici ai fini della sicurezza del generatore sulla base della specifica formazione ricevuta e dell'esperienza operativa.

Vista l'importanza di un'adeguata formazione, teorica e pratica, del il recente D.M. n° 94 del 07/08/2020 definisce nel dettaglio tempistiche e contenuti della formazione dell'aspirante conduttore, requisito preliminare per l'ammissione all'esame di abilitazione.

In tale contesto gli autori del presente articolo si stanno impegnando, unitamente ad altri tecnologi inseriti in uno specifico obiettivo del Piano di ricerca 2022-2024 dell'INAIL, a mettere a punto un sistema di formazione dell'aspirante conduttore basato sull'impiego della realtà virtuale, simulando determinate condizioni di transitorio o di esercizio ed infine di emergenza.

Una ulteriore attività si è sviluppata sulla realizzazione di uno spazio attrezzato, utile per illustrare al discente i vari accessori del generatore e, a spazio completamente realizzato, un simulacro di generatore per l'individuazione e la descrizione dell'operabilità degli accessori montati.

2. Finalità simulazione

Preliminarmente si è proceduto a definire una serie di condizioni operative del generatore, individuando parallelamente gli accessori interessati che devono essere presenti nella simulazione ed operabili dal conduttore.

L'obiettivo dichiarato è mettere il conduttore di fronte a stati di esercizio in cui possa esercitare le proprie conoscenze acquisite durante le fasi teorica e pratica del corso di formazione, entrambe obbligatorie.

La definizione delle condizioni operative, attualmente ancora non esaustive, è sintetizzata nella tabella 1.

Nella prima fase di realizzazione ci si è concentrati sullo studio dei primi sei scenari: accensione, spegnimento, variazione del livello, aumento della pressione, verifica qualità dell'acqua, verifica impianto combustione. Collegati a questi sei scenari sono in approfondimento anche gli scenari 8, 16 e 17: controllo dell'efficienza e sufficienza delle valvole di sicurezza, controlli blocco basso livello e controlli blocco alta pressione.

| Fase | Descrizione |
|------|--|
| 1 | Presenza in consegna, Presenza in carico, Accensione |
| 2 | Spegnimento |
| 3 | Variazione del livello dell'acqua |
| 4 | Variazione della pressione |
| 5 | Verifica qualità dell'acqua |
| 6 | Verifica impianto combustione |
| 7 | Temperatura fumi |
| 8 | Controllo efficienza VDS |
| 9 | Controllo alimentazione acqua |
| 10 | Verifica sistema spurgo |
| 11 | Apertura valvola presa vapore |
| 12 | Manovre collettore principale |
| 13 | Visita interna |
| 14 | Prova idraulica |
| 15 | Prova di funzionamento |
| 16 | Controlli blocco per basso livello |
| 17 | Controlli blocco per alta pressione |
| 18 | Controlli blocco bruciatore |

Tabella 1. Scenari di addestramento

Lo scopo è quello di porre il discente di fronte ad alcune specifiche e prevedibili situazioni e studiarne le reazioni sotto pressione, correggendo comportamenti scorretti. Si ottiene inoltre un controllo sull'attuazione di attività di routine dei conduttori.

3. Principali accessori di sicurezza, regolazione e alimentazione dell'insieme generatore coinvolti nella simulazione

Di seguito si riportano i principali accessori di sicurezza, controllo, regolazione e alimentazione del generatore coinvolti nella simulazione, ipotizzando una conduzione continua da parte del conduttore. In caso di conduzione non continua,

molti dei compiti svolti dal conduttore vengono svolti dalla strumentazione opportunamente predisposta allo scopo dal fabbricante.

a) Valvola di sicurezza

Si tratta di accessori del generatore che costituiscono l'estrema difesa contro il cedimento strutturale. Il loro dimensionamento deve essere eseguito per garantire lo scarico di tutta la producibilità del generatore. In condizioni di normale utilizzo le valvole restano in una condizione di equilibrio tra la spinta sul piattello del vapore e la forza esercitata dalla molla. Nelle condizioni di fallimento dei dispositivi di regolazione e di blocco, la spinta del vapore all'interno della camera supera (con una tolleranza definita, generalmente tra il 5% e il 10%) la forza che la molla è in grado di trasferire al piattello per mezzo dello stelo e si verifica l'apertura della valvola di sicurezza. Il vapore fluisce dalla camera verso l'esterno del generatore (attraverso condotti di convogliamento viene scaricato all'esterno della centrale termica; questi condotti sono limitando le perdite di carico e gli ostacoli al deflusso del vapore).

Il conduttore, dunque, si trova di fronte ad un dispositivo che nelle condizioni ordinarie si mostra apparentemente ininfluenza nei riguardi del funzionamento del generatore, tuttavia assume particolare importanza nei transitori di emergenza, assicurando la stabilità del generatore. La diretta conseguenza di questa "apparente" estraneità della valvola di sicurezza al funzionamento a regime, è la possibilità che il conduttore sottovaluti l'importanza del dispositivo: è dunque essenziale far comprendere come la valvola di sicurezza debba essere costantemente sorvegliata, cogliendo i segnali di degrado (es. trafilemanti) e verificando che la stessa non risulti incollata (incollamento otturatore-sede) attraverso un puntuale controllo eseguito agendo sull'apposita leva. Non è infatti affatto sufficiente il controllo periodico (requisito minimo) che il soggetto preposto esegue con le periodicità definite dall'allegato VII del d.lgs. 81/08 e ss. ii. mm.. È compito del conduttore eseguire un costante monitoraggio del dispositivo.

b) Indicatore di livello

L'indicatore di livello fornisce al conduttore un'indicazione di massima del livello dell'acqua all'interno del generatore; si tratta di un'indicazione di massima in rapporto alle condizioni operative del generatore. Va infatti osservato che il livello all'interno del generatore subisce delle fluttuazioni legate al meccanismo di generazione del vapore, rendendo quanto meno critica la determinazione del corretto livello (va da sé che tale aspetto è maggiormente critico per i livellostati, giacché le sonde risultano ostacolate nella rilevazione proprio da questi fenomeni interni al generatore). Va inoltre osservato come l'indicatore di livello realizzi un trasferimento dell'informazione dall'interno del generatore verso l'esterno, introducendo immancabilmente, in funzione della differente temperatura dell'acqua, un errore di lettura che tuttavia resta a favore della sicurezza (ovviamente nella camera del generatore l'acqua avrà una temperatura maggiore e il livello interno

risulterà maggiore di quello indicato dallo strumento). Tutto quanto detto vale nella misura in cui l'indicatore resti efficiente e sia garantita la comunicazione tra l'indicatore e l'interno camera; in quest'ottica il conduttore dovrà vigilare, verificando periodicamente che tale comunicazione sia assicurata (agendo sulle valvole a corredo dell'indicatore con sequenza predefinita).

c) Sistemi di spurgo

Si tratta di sistemi vitali per la corretta gestione dei generatori, attraverso questi sistemi si realizza il contenimento dei valori di concentrazione dei sali incrostanti nell'acqua di caldaia. Quando le analisi dell'acqua richiedono l'abbattimento della concentrazione di uno degli incrostanti monitorati, il sistema (automatico o manuale) deve effettuare uno scarico di acqua di caldaia che verrà reintegrata con acqua di alimento (valori di concentrazione abbattuti). Considerazioni di carattere termodinamico consigliano di effettuare una mediazione sui valori di spurgo al fine di contenere perdite e concentrazioni. È compito del conduttore verificare le concentrazioni degli incrostanti nell'acqua (oggi supportato da strumentazioni automatiche di rilevazione della qualità dell'acqua) e sorvegliare che tali valori non eccedano mai i limiti imposti dalle norme tecniche di riferimento, garantendo lunga vita al generatore e contenendo anche l'impatto che il generatore ha sull'ambiente. Sarà compito del conduttore accertare le motivazioni di un eventuale sistematico superamento dei valori di concentrazione, valutando anche l'efficienza del ciclo di trattamento dell'acqua.

d) Pressostato di regolazione

Come abbiamo visto nelle considerazioni generali i moderni generatori sono dotati di sistemi sempre più efficienti di ausilio al conduttore. Il pressostato di regolazione assicura, in particolare, il mantenimento delle condizioni operative del generatore all'interno del range di funzionamento voluto. I limiti di esercizio sono limiti operativi e si mantengono distanti dai limiti massimi ammissibili in misura più o meno accentuata rispetto alle richieste dell'impianto. A regime, il pressostato di regolazione procede automaticamente all'accensione, modulazione o spegnimento del sistema di combustione, mantenendo il generatore all'interno dell'intervallo di pressioni di esercizio. Il fallimento del pressostato di regolazione pone il generatore in una condizione di funzionamento comunque emergenziale, fuori dal target richiesto dall'impianto; benché i dispositivi posti a protezione dell'impianto a valle consentano il mantenimento delle condizioni di sicurezza delle attrezzature presenti, tale regime di funzionamento è ovviamente da evitare. Compito del conduttore, dunque, è quello di mantenere sotto monitoraggio la pressione operativa del generatore, intervenendo quando questa dovesse anche occasionalmente eccedere i limiti di esercizio imposti. Vale la pena sottolineare che ci stiamo riferendo ai limiti di esercizio e non al limite massimo ammissibile per il generatore.

e) Pressostato di sicurezza

Nel punto precedente abbiamo preso in considerazione i limiti di esercizio del generatore; in caso di superamento del range di esercizio, la pressione inizia a salire approssimandosi più o meno gradualmente (in funzione, ad esempio, della situazione della richiesta da parte dell'impianto) alla pressione massima ammissibile del generatore. Tale aumento va contrastato in modo adeguato: il pressostato di sicurezza assicura in tal senso l'arresto del sistema di combustione, mantenendosi in posizione di blocco sino a che il conduttore non avrà effettuato le necessarie verifiche e abbia fornito il consenso alla ripartenza. Appare chiaro come il pressostato di sicurezza imponga una condizione di arresto del generatore, che coinvolga il conduttore in attività di controllo delle motivazioni dell'intervento di tale dispositivo. Vale la pena in questo contesto introdurre un concetto di progressività dei valori di intervento dei dispositivi preposti al controllo della pressione, con la sequenza imposta (in termini di pressione massima) indicata nella figura 1.

f) Manometro

Analogamente agli indicatori di livello i manometri costituiscono degli accessori di osservazione fondamentali per monitorare i parametri operativi del generatore. La posizione del manometro deve garantire la costante e agevole visibilità dello strumento da parte del conduttore. Deve essere segnalata in modo evidente e affidabile la massima pressione ammissibile del generatore, in modo che il conduttore abbia l'immediata percezione dell'approssimarsi della stessa e possa porre in atto tutti i provvedimenti del caso. Vale la pena di osservare, in questo contesto, come lo strumento debba periodicamente essere sottoposto a controllo per verificare l'efficienza e la validità delle indicazioni fornite.

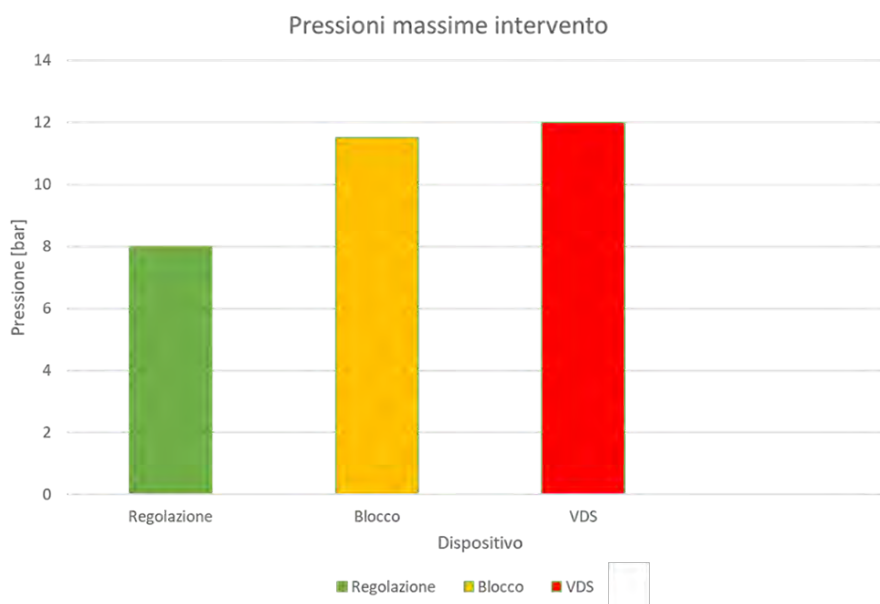


Figura 1. Esempio di progressività di intervento.

g) Livellostato di regolazione

Il livellostato di regolazione ha il compito di mantenere il livello dell'acqua nel generatore in un range tra un valore minimo ed un valore massimo. A seconda che la regolazione sia continua (la pompa di alimentazione resta sempre attiva o al più varia il proprio regime di funzionamento) o discontinua (la pompa viene accesa o spenta a seconda del livello rilevato), il regolatore agisce sulla pompa di alimentazione in modo da garantire la presenza o l'assenza del flusso di acqua in ingresso al generatore. La scelta migliore per l'alimentazione del generatore coincide con un'alimentazione continua, che garantisce una maggiore stabilità del livello dell'acqua. Compito del conduttore sarà quello di vigilare sull'efficienza del dispositivo.

h) Livellostato di blocco

Svolge una funzione analoga al pressostato di blocco, inducendo l'arresto del sistema di combustione in caso di raggiungimento del valore di livello minimo. L'intervento diretto del conduttore è essenziale, dopo i controlli del caso connessi alla possibile scopertura delle parti esposte alla fiamma, e dopo aver verificato i motivi che hanno portato al blocco, al fine di consentire il riavvio del generatore.

i) Termostato

Il termostato viene impiegato solo in alcuni specifici casi, laddove la temperatura risulta non correlata alla pressione (es. surriscaldatore e risurriscaldatore, circuito primario dei generatori indiretti di vapore).

j) Dispositivi di rilevamento fiamma

Sono dei dispositivi che garantiscono la sicurezza del funzionamento in camera di combustione. Si tratta di dispositivi specificamente progettati in funzione del tipo di combustibile utilizzato, sensibili ai diversi intervalli dello spettro della luce (es. luce visibile per combustibili liquidi, ultravioletto per il metano) o capaci di sfruttare le specifiche caratteristiche del combustibile impiegato (es. sonde a ionizzazione). Lo scopo di tali dispositivi è quello di garantire l'afflusso di combustibile solo in presenza di fiamma nella camera di combustione. Soprattutto nel caso di combustibili liquidi è compito del conduttore verificare l'efficienza dei dispositivi rilevando anomalie evidenti nel loro funzionamento.

4. Definizione delle condizioni operative per la simulazione

Di seguito si riportano i principali scenari previsti per la simulazione di una conduzione di un generatore di vapore, con il coinvolgimento dei relativi accessori e ausiliari e le possibili soluzioni allo scenario analizzato.

4.1 Primo scenario: Presa in consegna, Presa in Carico

Prima di procedere all'accensione del generatore occorre prenderlo in consegna detta attrezzatura con particolare riferimento alla documentazione: Libretto matricolare (per generatori costruiti ante direttiva PED) o Dichiarazione di conformità CE-PED dell'insieme Generatore di Vapore, manuale d'uso e manutenzione dello stesso. Verificare la corrispondenza dei dati di targa del generatore con quanto riportato nella documentazione.

Per quanto riguarda la conduzione di un impianto su cui non si è acquisita esperienza diretta è necessario attenersi scrupolosamente alle indicazioni riportate sul libretto d'uso e chiedere informazioni ai colleghi conduttori su eventuali anomalie di funzionamento.

Altro aspetto da considerare è il cambio turno: il conduttore deve controllare le registrazioni dei turni precedenti su un apposito registro, fare un'ispezione attenta dell'impianto, rilevando eventuali deformazioni della camera di combustione. È buona norma farsi fare un piccolo resoconto dagli altri conduttori della centrale termica su eventuali anomalie degne di nota durante il turno precedente.

4.2 Secondo scenario: Transitorio di accensione

Accessori e ausiliari coinvolti: tutti; es. indicatore di livello, valvole di intercettazione dell'acqua, valvole manuali di intercettazione del combustibile, pompa di alimentazione acqua, manometro, pressostato di regolazione e di blocco, valvole di sicurezza, valvola di scarico, ventilatore, controllo fiamma, valvola di presa vapore.

Soluzione: controllo del livello dell'acqua – controllo valvole di intercettazione dell'acqua e del combustibile – (se a gas: Controllo manometri o pressostato di minima e di massima del gas e delle valvole di tenuta) - operatività della pompa di alimentazione dell'acqua – verifica della pressione in camera (in avviamento) – taratura del pressostato di regolazione – controllo visivo delle valvole di sicurezza – posizione della valvola di scarico (deve essere chiusa) – ripristino del livello attivando la pompa – avvio del bruciatore e controllo del lavaggio camera di combustione tramite il ventilatore – verificare che il bruciatore non vada in blocco per mancanza di fiamma – al raggiungimento di una data pressione, apertura graduale della valvola di presa vapore

4.3 Terzo scenario: Transitorio di spegnimento del generatore

Accessori e ausiliari coinvolti: tutti; es. indicatore di livello, valvole di intercettazione dell'acqua, valvole manuali di intercettazione del combustibile, pompa di alimentazione acqua, Manometro, Pressostato di regolazione e di blocco, Valvole di sicurezza, Valvola di scarico, Ventilatore, Controllo fiamma, Valvola di presa vapore.

Soluzione: controllare il livello dell'acqua nel generatore – spegnere il bruciatore – (arrestare pompa dell'acqua) – chiudere la valvola di intercettazione dell'acqua (se

fredda) – chiudere la valvola di adduzione del combustibile – chiudere la valvola di presa vapore.

4.4 Quarto scenario: Variazione livello acqua (abbassamento)

Accessori e ausiliari coinvolti: Valvole di intercettazione, Sistema di trattamento acque (serbatoio di accumulo, filtri meccanici), Indicatore di livello, livellostato segnala basso livello (allarme visivo e sonoro), Pompe di alimento, Spurgo, Valvola di scarico rapido, Valvola di presa vapore.

Soluzione: Prendere visione del livello che scende – verificare che non ci sia acqua per terra - controllare pompa di alimento, valvole intercettazione (possono essere chiuse) – verificare che ci sia acqua nel serbatoio di accumulo – verificare funzionamento sistema trattamento acqua (filtri meccanici intasati) – resettare allarmi in caso siano scattati – prima di riarmare il blocco del livellostato verificare che non sia scomparsa l'acqua dal livello visivo – lo scarico di fondo deve essere chiuso.

4.5 Quinto scenario: variazione della pressione (aumento)

Accessori e ausiliari coinvolti: Valvola di sicurezza, Pressostato di blocco, Pressostati di regolazione (minima e massima), Valvole di intercettazione, Valvola di presa vapore, Valvola di non ritorno (uno per il generatore, una per la linea dell'acqua), Manometro, ecc.

Soluzione: Verificare il manometro – scatta un allarme di alta pressione, se non si fa nulla interviene il pressostato di blocco, infine si apre la valvola di sicurezza – malfunzionamento pressostato di blocco (si apre prima la valvola di sicurezza, ma non il pressostato di blocco) - dopo l'intervento della valvola di sicurezza verificare se la pressione aumenta (in tal caso è progettata male la valvola di sicurezza o la tubazione di convogliamento).

4.6 Sesto scenario: Verifica qualità dell'acqua (controllo trattamento acqua (parametri fisico-chimici))

Accessori e ausiliari coinvolti: Impianto di trattamento acque: Filtri meccanici, Osmosi inversa, Demineralizzatore, Addolcitore, Decarbonatazione, Degasatore, - Analizzatori automatici, Pompe di circolazione

Soluzione: Filtraggio meccanico intasato - addolcimento: mancanza sale - demineralizzazione: resine esauste. Controllo dei parametri/ analisi.

4.7 Settimo scenario: Verifica impianto di combustione

Accessori e ausiliari coinvolti: Bruciatore, Ventilatore, Serranda comburente, Dispositivo di rilevamento fiamma, Rampa gas: Pressostato di minima gas e Pressostato di massima gas, - Combustibile liquido, Pompa combustibile liquido, Preriscaldatore, Combustibile solido, Griglia, Specola visiva, ecc.

Soluzione: Verificare dispositivo di rilevamento fiamma – Verificare funzionamento ventilatore – verificare la rampa di alimentazione del gas (o alimentazione

combustibile liquido o combustibile solido) – verifica del circuito di innesco – lavaggio camera di combustione.

5. Lo spazio attrezzato

La progettazione dello spazio attrezzato tiene conto della disponibilità dello spazio; in tale ottica la soluzione ideale deve prevedere l'articolazione degli spazi di esposizione in zone tematiche, interessando i principali accessori del generatore allocati nelle zone di pertinenza dei singoli sistemi. Si crea, ad esempio, una zona dedicata al controllo del livello, dove potranno essere allocati gli indicatori di livello, i livellostati, particolari delle sonde di livello e la sezione livello del quadro allarmi. Su questo principio si sono, quindi, individuate otto aree, come indicato nella tabella 2.

| Area | Settore tecnico | Accessori |
|------|--------------------------|---|
| 1 | Mezzi di alimentazione | Pompe Mezzi di emergenza Trattamento acque |
| 2 | Accessori di regolazione | Pressostati Livellostati Termostati (ove necessari) |
| 3 | Accessori di sicurezza | Pressostati Livellostati Termostati (ove necessari) Valvole di sicurezza Intercettazione combustibile Controllo fiamma |
| 4 | Accessori di controllo | Manometri Indicatori di livello Termometri Qualità acqua |
| 5 | Membrature di ispezione | Passo d'uomo Passo di mano Spioncini |
| 6 | Accessori di servizio | Quadro di manovra Gruppi riduttori Scarico rapido Valvola di ritegno Valvola presa vapore |

| | | Spurgo |
|---|---------------------|---------------------------------|
| 7 | Combustione | Bruciatore gas |
| | | Bruciatore gasolio |
| | | Griglie per solidi |
| | | Dispositivi controllo fiamma |
| | | Rampa gas |
| | | Accessori gasolio |
| | | Elementi del bruciatore |
| 8 | Generatore completo | |

Tabella 2. Aree spazio attrezzato

6. Conclusioni

In questo lavoro sono state analizzate le condizioni e le metodologie utili a tradurre in pratica i percorsi formativi per gli aspiranti conduttori.

In tale contesto assume un'importanza primaria la formazione del futuro conduttore, sia attraverso la realizzazione di spazi attrezzati dei dispositivi essenziali all'esercizio del generatore, sia attraverso la realizzazione di simulatori che forniscano (anche attraverso sistemi a realtà virtuale o aumentata) strumenti di addestramento realistici.

Lo scopo è quello di porre il discente di fronte ad alcune specifiche e prevedibili situazioni e studiarne le reazioni sotto pressione, correggendo comportamenti scorretti. Si ottiene inoltre un controllo sull'attuazione di attività di routine dei conduttori.

7. Bibliografia

[1] Decreto Ministeriale n. 94 del 07/08/2020

[2] Norma UNI EN 12952 serie completa.

[3] Norma UNI EN 12953 serie completa.

[4] Norma UNI/TS 11325 serie completa.

Una piattaforma immersiva per il training di certificatori e conduttori di generatori di vapore

F. Giannini¹, K. Lupinetti¹, M. Monti¹, L. Mantelli², A. Traverso², G. Augugliaro³, S. Anastasi³, L. Monica³

¹ Cnr - Istituto di Matematica Applicata e Tecnologie Informatiche "E. Magenes"

² Unige - Dipartimento di Meccanica Energia Gestionale e dei Trasporti

³ Inail - Dit

Abstract

L'esperienza sugli infortuni sul lavoro, maturata negli anni da INAIL, dimostra che molto spesso questi sono dovuti ad inadeguata conoscenza della modalità d'uso delle attrezzature di lavoro e dei rischi connessi al loro utilizzo. Ciò evidenzia l'importanza di costruire dei percorsi formativi che siano realmente efficaci, soprattutto nel ridurre al minimo la possibilità di errore o malfunzionamento.

Nel caso dei generatori di vapore, il legislatore, conscio della loro pericolosità e della necessità di una formazione puntuale, richiede una qualifica specifica. In alcuni casi, tale qualifica è ottenibile solo in seguito al completamento di un periodo di addestramento da svolgersi direttamente sull'attrezzatura, la cui durata varia a seconda del tipo di dispositivo. Questa parte dell'apprendimento sul posto può esporre gli operatori a situazioni pericolose; pertanto, generalmente essa prevede soltanto lo svolgimento di attività in situazioni di regolare funzionamento. Grazie ai più recenti progressi tecnologici nel campo della realtà virtuale (VR) e della simulazione, è possibile creare ambienti virtuali, realistici e immersivi, in cui simulare attività lavorative ordinarie e straordinarie che gli studenti possono sperimentare in modo sicuro, coinvolgente e naturale. Questo documento presenta un sistema di formazione immersiva personalizzabile per verificatori e conduttori di generatori di vapore, creato integrando modelli di simulazione dinamica in un ambiente tridimensionale di realtà virtuale immersiva per riprodurre fedelmente le interazioni dell'utente con le apparecchiature e il comportamento del generatore. Il sistema è stato sviluppato nell'ambito del progetto PITSTOP, bando BRIC 2019 finanziato da INAIL, ed è stato verificato su due diversi casi studio.

Keywords: sistemi di training in realtà virtuale, simulazione dinamica, interazione naturale.

1. Introduzione

Nonostante l'attenzione sempre maggiore verso gli aspetti di sicurezza, lo sviluppo e l'integrazione di processi di automazione e remotizzazione, gli ambienti di lavoro che coinvolgono materiale pericoloso o esposizione a rischio elevato mantengono una

pericolosità intrinseca che può essere ridotta ma non annullata. La maggior parte degli incidenti che si verificano negli ambienti lavorativi sono dovuti all'errore umano a causa di scarsa conoscenza o inadeguata manutenzione degli strumenti utilizzati e sottovalutazione dei rischi correlati alle attività svolte. È quindi fondamentale che il lavoratore possieda le competenze necessarie per ridurre al minimo la possibilità di errore o malfunzionamento delle attrezzature. Per tale ragione, le normative vigenti impongono la partecipazione a specifici corsi formativi mirati a creare consapevolezza e conoscenza delle procedure da seguire. Inoltre, per la conduzione e manutenzione delle attrezzature più pericolose, è generalmente richiesto il possesso di relativa abilitazione.

Tra le apparecchiature potenzialmente pericolose che richiedono una competenza specifica per il loro funzionamento e verifica, i generatori di vapore sono soggetti a normative dedicate, che stabiliscono regole da rispettare per la loro installazione, condizioni di lavoro, monitoraggio e verifica. Infatti, a causa del rischio intrinseco di questo tipo di apparecchiature, le normative vigenti impongono anche verifiche periodiche della loro corretta installazione, condizioni di lavoro e manutenzione. Tali procedure vengono eseguite da specifici enti autorizzati, i cui professionisti apprendono le operazioni di verifica tramite studi teorici delle normative vigenti e delle linee guida esistenti, senza però una formazione sul campo. Per quanto riguarda la conduzione di generatori di vapore, l'attuale normativa italiana¹ richiede l'acquisizione di una specifica qualifica, che si ottiene frequentando specifici corsi di formazione volti a creare consapevolezza e conoscenza delle corrette procedure da seguire. A seconda delle caratteristiche dell'attrezzatura, vengono definiti quattro livelli di qualificazione, che richiedono conoscenze crescenti sugli aspetti funzionali e teorici sottostanti. Inoltre, per i generatori di elevata producibilità e quindi potenzialmente più pericolosi, è obbligatorio un periodo di addestramento pratico sul campo, per un numero di giorni di formazione dipendente dalla producibilità del vapore erogato dal generatore. Purtroppo, la disponibilità di caldaie ad altissima capacità è limitata, riducendo la possibilità per i nuovi operatori di trovare una sede per la loro formazione. Inoltre, questa fase di apprendimento sul campo è di per sé pericolosa ed è generalmente limitata allo svolgimento delle attività in situazioni regolari. Pertanto, se da un lato si adatta perfettamente ad apprendere le procedure per la conduzione quotidiana e la manutenzione periodica dell'attrezzo, l'apprendimento della gestione di situazioni critiche, di emergenza, di malfunzionamento o delle conseguenze di operazioni sbagliate è generalmente (e auspicabilmente) limitato alla sola teoria e manca di un efficace riscontro nella pratica. Queste limitazioni possono essere superate sfruttando le possibilità fornite dai più recenti sviluppi tecnologici che permettono da un lato la simulazione di fenomeni fisici, chimici e meccanici e dall'altro la realizzazione di sistemi di realtà virtuale immersivi (VR) che offrono la possibilità di riprodurre in modo realistico ambienti e situazioni in cui l'utente si sente parte dell'ambiente stesso [1-11]. Da vari

¹ DM 2020, Decreto n. 94 del 7 agosto 2020

decenni ed in vari contesti (es. aeronautica, industria manifatturiera, medicina), la simulazione è stata considerata come la via “alternativa” indispensabile e necessaria per poter sperimentare “concretamente” quanto appreso, in particolare per affrontare le situazioni di emergenza, inusuali e potenzialmente pericolose. L'utilizzo della realtà virtuale ed immersiva nella simulazione offre il vantaggio di creare un “ambiente protetto” nel quale è possibile apprendere in modo attivo sfruttando gli errori come risorse per simulare situazioni di emergenza e azioni di risposta. In un ambiente virtuale è possibile simulare situazioni a diversi gradi di complessità favorendo quindi la realizzazione di un percorso di apprendimento strutturato, in cui sia facile ed immediato accedere a materiale dimostrativo, tecnico e normativo mentre si eseguono operazioni. La possibilità di collegare le azioni e le modifiche dei parametri degli strumenti di lavoro a strumenti matematici in grado di simulare l'effettiva attività del processo amplia drasticamente l'insieme delle situazioni verificabili e la qualità dell'apprendimento.

In quest'ottica, nell'ambito del progetto PITSTOP [12], finanziato da INAIL, si è realizzato un simulatore in realtà virtuale immersiva per l'acquisizione delle competenze necessarie alla gestione e verifica delle caldaie in modo strutturato e, allo stesso tempo, sicuro, integrando in tempo reale un ambiente VR 3D immersivo con il modello dinamico delle apparecchiature. Per verificarne l'adattabilità a soddisfare i requisiti imposti dal Decreto Ministeriale¹, che definisce i requisiti per la conduzione di generatori di vapore, il simulatore è stato sviluppato e verificato su due caldaie di differente producibilità: un generatore di vapore GVE 160 di piccola taglia, parte del laboratorio Innovative Energy System (IES) del Thermochemical Power Group (TPG) dell'Università degli Studi di Genova, installato presso il campus di Savona, e uno di grande scala ed elevata producibilità, ovvero il generatore di vapore ausiliario per la centrale termoelettrica a ciclo combinato di Tirreno Power a Quiliano (SV).

2. I requisiti

Per supportare l'approccio “imparare facendo” e per soddisfare le esigenze di formazione sia degli operatori che dei professionisti incaricati della verifica periodica, il sistema di formazione proposto è stato sviluppato considerando i seguenti requisiti:

- fornire percorsi di apprendimento specifici per i profili professionali considerati, caratterizzati da differenti mansioni da svolgere;
- fornire materiale didattico;
- supportare la comprensione delle azioni da eseguire per raggiungere gli obiettivi assegnati;
- presentare diversi scenari, corrispondenti a procedure di lavoro standard, nonché condizioni anomale;
- fornire realismo in termini del comportamento dell'apparecchiatura in risposta alle azioni dell'utente;

- permettere un adeguato grado di realismo dell'ambiente e dell'interazione naturale con l'attrezzatura, in modo da prendere confidenza con i gesti e le operazioni da compiere nella vita reale;
- supportare la verifica dell'apprendimento del tirocinante;
- essere facilmente adattabile per la formazione su diversi generatori di vapore, considerando i requisiti specifici necessari per acquisire la corrispondente certificazione.

3. Organizzazione del simulatore PITSTOP

Per garantire sia le funzionalità di acquisizione che di verifica della conoscenza, il simulatore offre due diverse modalità di utilizzo: (i) apprendimento e (ii) verifica.

Durante lo svolgimento di tutte le attività, il discente ha accesso ai documenti del corso teorico e al manuale d'uso del generatore. Nel caso del profilo verificatore, è possibile avere accesso a tutta la documentazione relativa al generatore da cui estrarre i dati da inserire nella scheda tecnica e nel verbale di fine verifica. Il verificatore è supportato anche da checklists che rimandano ai vari campi dei documenti da compilare, secondo quanto definito nelle linee guida fornite da INAIL [13]. Inoltre, in modalità apprendimento, è possibile visualizzare su richiesta spiegazioni sul significato dei campi da compilare e gli eventuali elementi del generatore a cui si riferiscono.

Per entrambe le figure professionali, fondamentale nell'apprendimento delle attività da svolgere è la possibilità di ricevere informazioni sul significato dei vari elementi del generatore e suggerimenti sulla sequenza delle azioni da eseguire e indicazione sugli errori compiuti. A tal proposito, nella modalità apprendimento, per le attività da svolgere sul generatore, il sistema, su richiesta dell'utente, visualizza un numero corrispondente all'ordine nella sequenza delle operazioni da svolgere accanto ad ogni attuatore su cui è necessario operare, come mostrato in Figura 1.

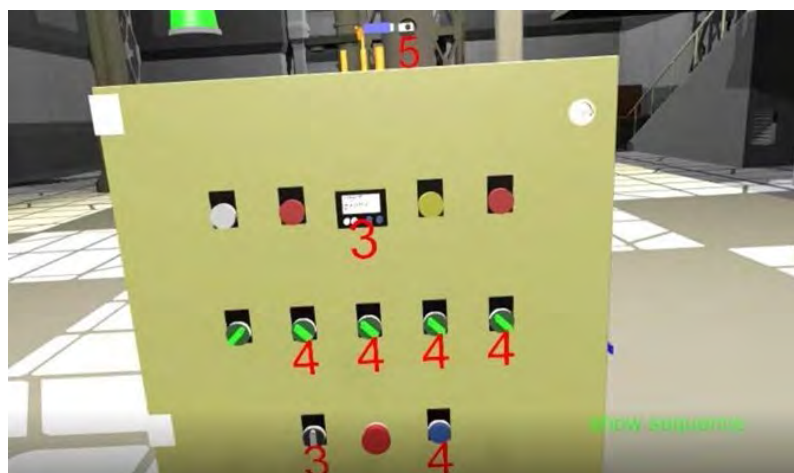


Figura 1. Visualizzazione della sequenza in cui gli attuatori devono essere azionati per svolgere correttamente il compito assegnato durante la formazione

Il sistema ad ogni passo verifica che l'azione svolta dal discente sia corretta (ovvero che tutti gli altri attuatori siano nella posizione corretta e che i parametri funzionali abbiano valori adeguati). In modalità apprendimento, nel caso di errore, il sistema informa immediatamente il discente attivando un allarme visivo e sonoro ed evidenziando l'attuatore azionato nel momento/modo sbagliato e indica quali elementi si trovano nello stato non idoneo. In modalità verifica, la comunicazione dell'errore avviene solo a compito completato; a questo punto il discente può cercare di correggere l'errore, ricominciare o interrompere l'esercizio.

Per le varie attività sono state considerate varianti corrispondenti sia a condizioni normali che anomale, in particolare quelle causate da configurazioni errate degli attuatori del sistema, elementi non funzionanti o ambienti non congrui con le normative vigenti [14]. In questo modo il discente può osservare e comprendere le conseguenze di eventuali errori, e imparare ad adottare le necessarie contromisure. Per completare la formazione, il discente deve completare tutte le attività richieste in entrambe le modalità di apprendimento e verifica, fino a quando non è in grado di svolgerle correttamente. A supporto della valutazione, il sistema tiene traccia del numero dei compiti svolti e dei tentativi effettuati per completare correttamente ciascun compito.

In tabella 1 sono riportate le attività previste per le due figure professionali e i due generatori considerati:

| Profilo discente | Verificatore | Operatore | |
|------------------|---|--|--|
| | | Generatore GVE 160 | Generatore TP |
| Attività | 1. Compilazione Scheda Tecnica 2. Compilazione verbale con Test di funzionamento elementi di controllo: <ul style="list-style-type: none"> i. Manometri ii. Livelli visivi acqua | 1. Attivazione 2. Accensione dopo spegnimento corretto 3. Accensione dopo spegnimento errato 4. Soluzione di problemi 5. Spegnimento 6. Test elementi di controllo: <ul style="list-style-type: none"> i. Livelli visivi acqua | 1. Lavaggio 2. Accensione, riscaldamento e pressurizzazione sino a 160° e 6 bar (3) 3. Riscaldamento e pressurizzazione > 160° e 6 bar 4. Soluzione di problemi 5. Test elementi di controllo: <ul style="list-style-type: none"> i. Livelli visivi acqua |

Tabelle 1. Attività previste per le due figure professionali

4. Componenti del simulatore

Il simulatore garantisce un adeguato realismo grazie all'integrazione con un modello dinamico che simula il comportamento del generatore in risposta alle azioni dell'utente. Il discente può interagire con l'apparecchiatura nell'ambiente virtuale agendo come farebbe nella realtà, e analizzare il funzionamento del generatore per mezzo di strumenti di misura e feedback audio-visivi.

Ambiente virtuale e modello dinamico comunicano tra loro scambiandosi informazioni sullo stato degli elementi di comando (attuatori) e di controllo (componenti di sicurezza e di misura) che vengono modellati sia nell'ambiente 3D

che nel modello dinamico, vedi figura 2. Gli attuatori possono essere manipolati direttamente dallo studente per alterare il funzionamento dell'apparecchiatura; in risposta il sistema ne può modificare la posizione (es. interruttore azionato) e l'aspetto (es. luce interna accesa). Diversamente, la modifica degli elementi di controllo dipende dal risultato del modello dinamico e, in particolare, dal sistema di controllo integrato al suo interno. Anche elementi di sicurezza, ad es. le valvole di sicurezza, vengono attivati dal simulatore funzionale, ma possono anche essere azionati dal discente per verificarne le condizioni di lavoro.

Per migliorare il senso di realismo nell'interazione nel mondo virtuale, grande attenzione è stata posta nella progettazione delle modalità di interazione dell'utente, evitando l'uso di controller e consentendo di interagire sugli attuatori con comandi gestuali [15]. L'utilizzo di menu è stato ridotto il più possibile, utilizzando modalità tipiche dei videogiochi [16]. Per la selezione di elementi distanti e per gli spostamenti si è utilizzato la metafora del puntamento con il raggio laser per fornire il feedback visuale della selezione effettuata. Nel caso di grandi spazi, lo spostamento è facilitato dalla creazione di punti di ancoraggio facilmente individuabili.

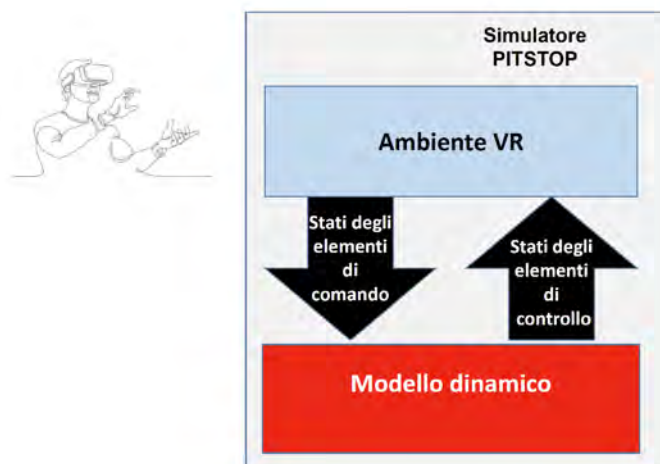


Figura 2. Comunicazione tra modello dinamico e ambiente virtuale

Il simulatore VR è stato sviluppato sfruttando il motore di gioco Unity, utilizzando il visore indossabile Oculus Quest 2 per l'esperienza immersiva, per l'acquisizione e il rilevamento dei gesti. La scelta è stata fatta considerando il miglior compromesso tra costi, capacità di rilevamento e libertà di movimento per l'utente. Il modello dinamico del simulatore funzionale [17] è stato sviluppato in ambiente Matlab-Simulink, seguendo un approccio misto basato sia su equazioni fisiche sia su strumenti numerici data-driven [18]. Per garantire un'elevata fedeltà di simulazione, il modello è stato calibrato e validato su dati reali raccolti durante il funzionamento delle caldaie reali adottate come casi studio.

La comunicazione tra i due ambienti è stata realizzata utilizzando il protocollo UDP (User Datagram Protocol) per lo scambio di dati attraverso una codifica JSON

(JavaScript Object Notation), che garantisce una certa flessibilità in caso di variazione o aggiunta di informazioni [19].

5. Adattabilità del sistema

Dal momento che la realizzazione di un sistema di supporto alla formazione di questo tipo richiede il coinvolgimento di diverse figure professionali, e quindi un ingente costo per la sua realizzazione, il sistema è stato sviluppato in modo da essere facilmente adattato a diversi scenari che coinvolgono diverse attrezzature e attività di formazione al fine di ridurre l'attività di sviluppo.

Il termine scenario si riferisce allo specifico generatore di vapore considerato (modello 3D, documentazione del generatore di vapore e ambiente 3D in cui è inserito), all'attività che il tirocinante deve svolgere, allo stato del generatore prima e dopo la conclusione dell'attività, alla corretta sequenza di operazioni da svolgere. Per ogni attività, ogni operazione svolta provoca il cambio di stato di un attuatore. Pertanto, sia la situazione iniziale che quella finale possono essere espresse in termini dei valori degli stati degli attuatori e degli elementi di controllo, i cui possibili valori appartengono ad un insieme limitato. Analogamente, si può notare che, in generale, esiste un numero limitato di possibili tipi di attuatori, componenti di controllo e sicurezza con un comportamento predefinito e prevedibile. Ciò consente di adattare facilmente il sistema quando si cambia l'attrezzatura su cui l'operatore deve essere addestrato.

Sulla base di questi presupposti, gli elementi fondamentali per garantire la flessibilità desiderata sono stati (i) un'organizzazione Object-Oriented dei componenti del generatore di vapore (attuatori, componenti di controllo e di sicurezza), e (ii) l'utilizzo di file per la specifica degli stati e delle operazioni degli elementi dell'apparecchiatura [20].

L'approccio object-oriented consente la facile estensione e sfruttamento di caratteristiche già definite attraverso la creazione di gerarchie di elementi (gerarchia di classi) che ereditano alcune proprietà e funzioni fondamentali. La gerarchia degli elementi utilizzata (vedi figura 3) non riflette il significato funzionale degli elementi operativi ma:

- se attuatori, il loro comportamento in risposta alle azioni dell'utente;
- se elementi di controllo, il loro comportamento in base al modo in cui le informazioni devono essere comunicate.

I ConsoleElement sono particolari attuatori definiti per la simulazione dei pannelli di comando/controllo che nel caso di generatori di elevata producibilità vengono generalmente gestiti da computer; in figura 4 esempio di riproduzione in VR dei pannelli di controllo del secondo generatore utilizzato come caso studio.

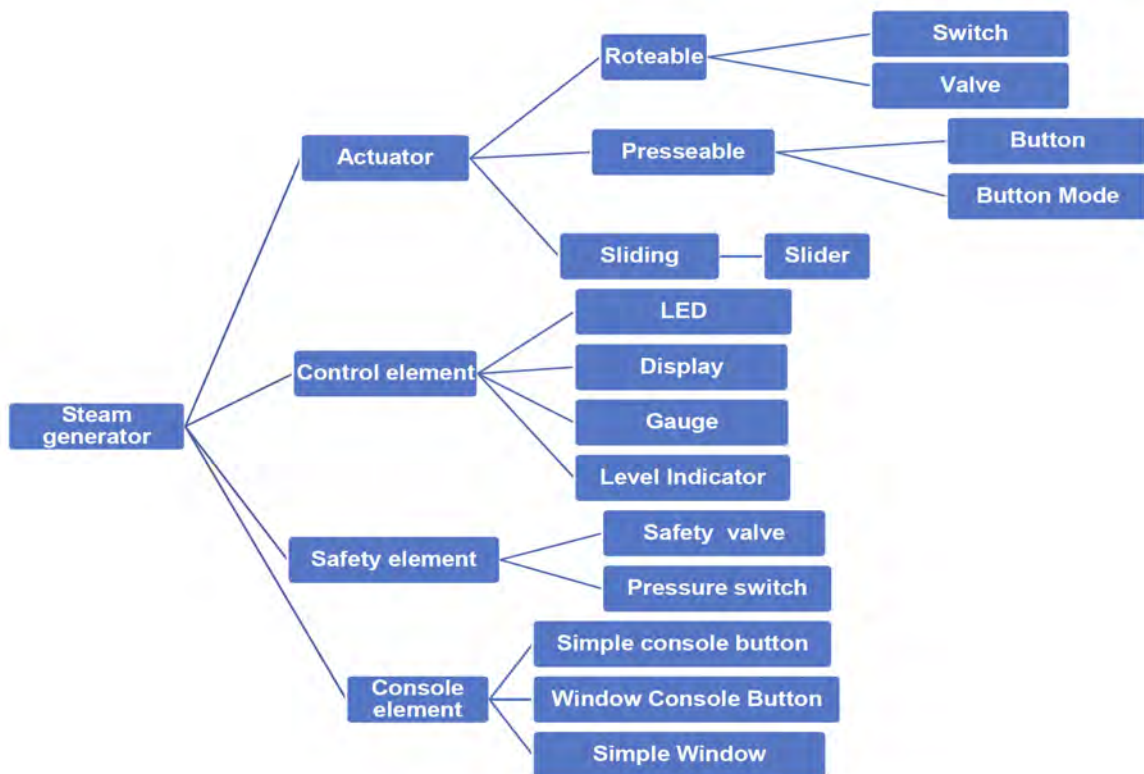


Figura 3. Gerarchia utilizzata per la specifica degli elementi importanti per l'interazione e controllo dei generatori di vapore

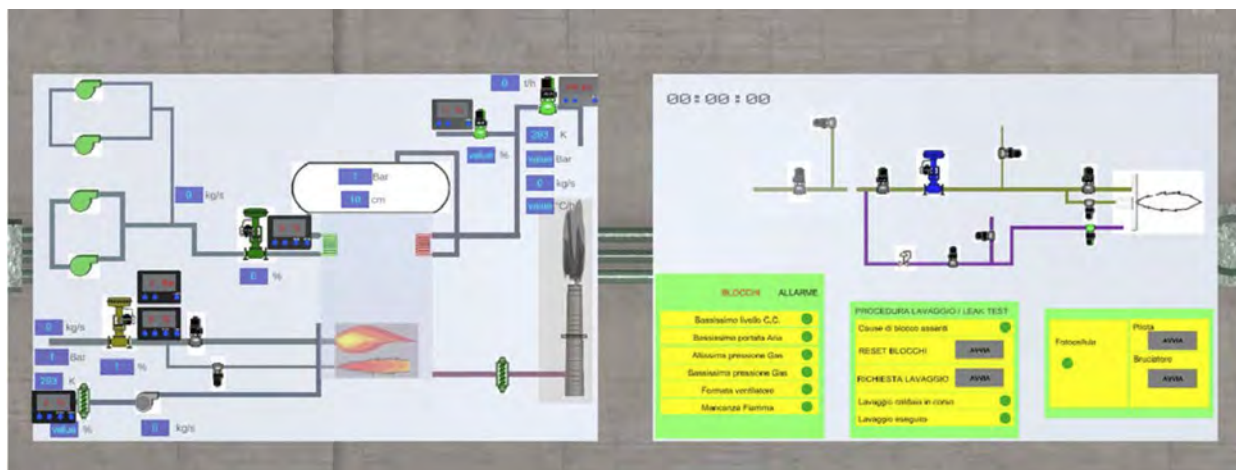


Figura 4. Pannelli di controllo del generatore di vapore ausiliario per la centrale termoelettrica a ciclo combinato di Tirreno Power in Savona

Sfruttando questa classificazione, la modifica dell'attrezzatura all'interno del sistema di formazione richiede: i) la creazione del modello 3D di ogni componente del generatore ii) l'associazione della classe e delle proprietà pertinenti a ciascun

modello 3D. Per ridurre il più possibile l'intervento manuale, l'associazione modello 3D della componente-classe corrispondente viene effettuata dal sistema grazie all'utilizzo di un file di configurazione in cui l'associazione <nome componente> <nome dell'Oggetto 3D> <classe componente> viene specificata insieme agli attributi caratterizzanti (es. numero di stati). Il nome viene quindi utilizzato negli altri file di specifica degli scenari. Specificare le sequenze delle azioni da svolgere in termini di modifica degli stati degli attuatori e le condizioni sugli stati degli elementi di controllo permette di limitare l'intervento dell'esperto di programmazione e/ dell'ambiente VR nell'inserimento di nuovi generatori e di nuovi compiti da eseguire.

L'adattabilità è stata verificata attraverso l'utilizzo dei due casi studio illustrati in Figura 5.

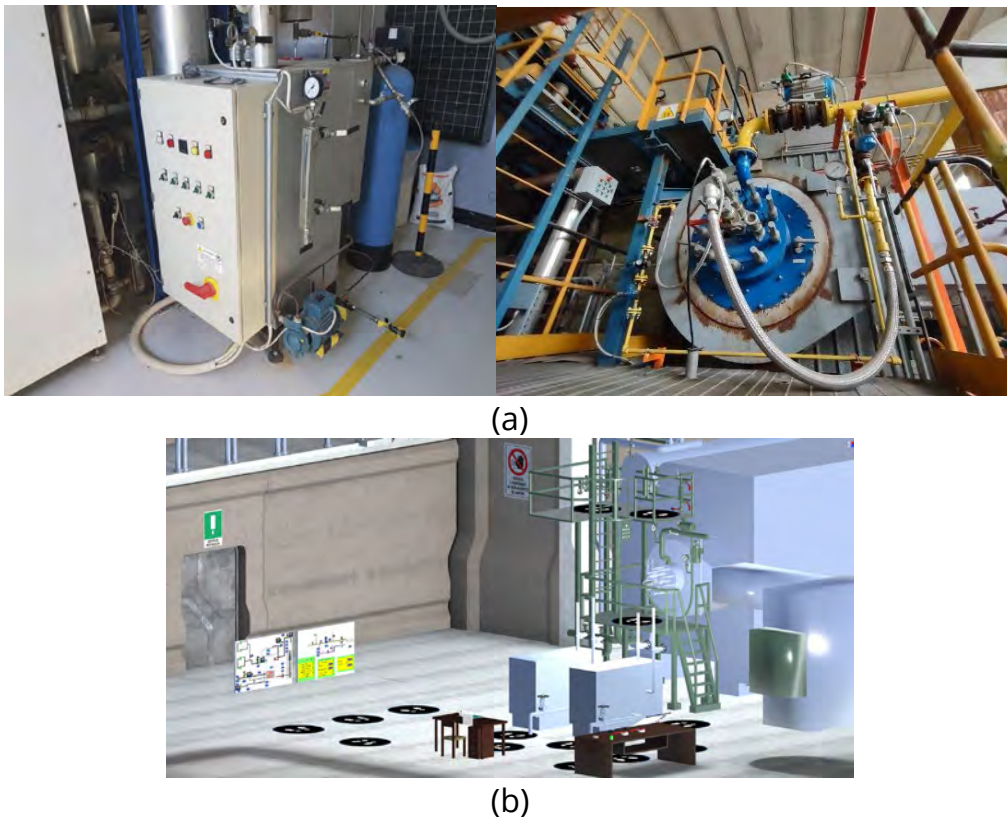


Figura 5. I due generatori considerati come caso studio GTE 160 e generatore ausiliario di Tirreno Power (a) e l'ambiente raffigurante il secondo caso studio (b)

6. Conclusioni

Questo articolo ha descritto un simulatore in ambiente virtuale immersivo per la formazione di conduttori e verificatori di generatori di vapore su scala industriale. I risultati ottenuti testando il simulatore hanno dimostrato che l'integrazione di modelli dinamici e ambienti VR garantisce un'esperienza sufficientemente realistica per imparare a svolgere attività di routine e per comprendere e trovare soluzioni a problematiche di funzionamento. Il modello è stato progettato per includere tutti i

componenti principali con cui l'utente può interagire, sia direttamente sull'impianto che attraverso un pannello di controllo virtuale remoto nel caso di generatori di elevata producibilità.

7. Ringraziamenti

Il lavoro è stato supportato da INAIL attraverso il programma BRIC'19. Gli autori ringraziano Yuanju Zhu per il supporto all'implementazione del sistema; ing. Marco Ferrando e ing. Carrieri Roberto e i colleghi di Tirreno Power per la messa a disposizione dei casi studio e il supporto alla specifica delle operazioni da svolgere; Sergio Camilletti per il supporto alla preparazione del materiale didattico e delle attività.

8. Bibliografia

- [1] Garcia Fracaro, S., Glassey, J., Bernaerts, K., and Wilk, M. Immersive Technologies for the Training of Operators in the Process Industry: A Systematic Literature Review. *Comput. Chem. Eng.*, 2022, 160
- [2] Hjelmervik, K., Nazir, S., and Myhrvold, A. Simulator Training for Maritime Complex Tasks: An Experimental Study WMU. *J. Marit. Aff.*, 2018, 17(1), pp. 17–30.
- [3] Colombo, S., and Golzio, L. The Plant Simulator as Viable Means to Prevent and Manage Risk through Competencies Management: Experiment Results. *Saf. Sci.*, 2016, 84, 46–56.
- [4] Al-Adawi, M., and Luimula, M. Demo Paper: Virtual Reality in Fire Safety-Electric Cabin Fire Simulation. Atti della Conferenza su 10th IEEE Int. Conf. Cogn. Infocommunications, CogInfoCom 2019 - Proc., 551–552.
- [5] Pérez, L., Diez, E., Usamentiaga, R., and García, D. F. Industrial Robot Control and Operator Training Using Virtual Reality Interfaces. *Com.in Ind.*, 2019, 109, 114–120.,
- [6] Fracaro, S.G., Chan, P., Gallagher, T., Ryo, J.T., Towards design guidelines for virtual reality training for the chemical industry, *Educ. Chem. Eng.* 2021, 36, 12– 23
- [7] Knoke, B., Thoben, K-D. Training simulators for manufacturing processes: Literature review and systematisation of applicability factors. *Comput Appl Eng Educ*, 2021, 29:1191–1207.
- [8] Nazir, S., Manca D. How a plant simulator can improve industrial safety *Process Saf. Prog.*, 2015, 34, 237-243
- [9] Patle, D.S., Manca, D., Nazir, S., Sharm, S. Operator training simulators in virtual reality environment for process operators: a review. *Virtual Real.*, 2019, 23, 293–311.
- [10] Pirola, C. Active Learning in Distance Education of Crude Distillation Unit by Virtual Immersive Laboratory: the Eye4edu Project. *Chem. En. Trans.*, 2021.86, 1363-1368.

- [11] Radhakrishnan, U.; Koumaditis, K.; Chinello, F. A systematic review of immersive virtual reality for industrial skills training. *Behav. Inf. Technol.* 2021, 40, 1310–1339.
- [12] PITSTOP, <http://pitstop.ge.imati.cnr.it/>, last accessed 2023/07/07
- [13] Tonti, A., Ferrari, E., Giannelli, G., Ricciardi, L., Sferruzza, G. Generatori di vapore e/o di acqua surriscaldata - Istruzioni per la prima verifica periodica ai sensi del d.m. 11 aprile 2011, collana Ricerche, © 2020 Inail ISBN 978-88-7484-634-4
- [14] UNI1604477 UNI/TR 11752:2019 Locali destinati al posizionamento di generatori di vapore e/o acqua surriscaldata e delle attrezzature ausiliarie
- [15] Vergara, D., Rubio, M., & Lorenzo, M. On the Design of Virtual Reality Learning Environments in Engineering. *Multimodal Technol. Interact.* 2017, 1(2)
- [16] Giannini, F., Alvisè Di Bernardo, M., Lupinetti, K., Anastasi, S., Monica, L., Monti, M., Augugliaro, G. Digital content interaction in 3D environments. Atti della Conferenza su 2022 IEEE International Conference on Metrology for Extended Reality, Artificial Intelligence and Neural Engineering (MetroXRINE), Rome, Italy, 2022, pp. 404-409
- [17] Mantelli, L., Ferrando, M., Traverso, A., Giannini, F., Lupinetti, K., Monti, M., Anastasi, S., Augugliaro, G., Monica, L. Integration of Dynamic Models and Virtual Reality for the Training of Steam Generator Operators. *J. Energy Resour. Technol.*, 2023, 145(6).
- [18] Rossi, I., Piantelli, L., Traverso, A., Gas Turbine Combined Cycle Flexibility: A Dynamic Model for Compressor Intake Conditioning Through a Heat-Pump. *ASME J. Eng. Gas Turbines Power*, 2019, 141(12), p. 121016.
- [19] Giannini, F., Lupinetti, K., Monti, M., Zhu, Y., Mantelli, L., Anastasi, S., Augugliaro, G., Monica, L. A Customizable VR System Supporting Industrial Equipment Operator Training. *Comput. Aided. Des. Appl.*, 2022, 716–730
- [20] Giannini, F., Lupinetti, K., Monti, M., Mantelli, L., Ferrando, M., Traverso, A., Giannini, F., Lupinetti, K., Monti, M., Anastasi, S., Augugliaro, G., Monica, L. Dynamic Simulator Integration in Virtual Reality Environment for Training Applications. Atti della Conferenza su CAD'23 – 10-12 luglio, 2023, Mexico City, MEXICO

Misure di riorganizzazione e continuità gestionale durante la pandemia: casi studio dalle ispezioni Seveso sull'industria di processo

R. Marrazzo, F. Vazzana

VAL-RTEC, ISPRA

Abstract

L'articolo rappresenta le attività di monitoraggio dei siti industriali, svolte durante il periodo COVID, con riferimento alle ispezioni sul Sistema di Gestione della Sicurezza degli stabilimenti industriali soggetti agli obblighi del d.lgs. 105/2015.

Partendo dal problema dello svolgimento delle ispezioni durante la pandemia, viene presentato il metodo alternativo introdotto dalle Autorità Competenti italiane per garantire la continuità, nel rispetto della procedura standard. Esso consiste nell'eseguire alcune fasi a distanza, individuando cosa si può svolgere tramite esame documentale e cosa in loco.

Vengono fornite informazioni sullo stato degli stabilimenti in caso di pandemia, con un focus su alcuni casi di studio dell'industria di processo. È stata assicurata la continuità gestionale delle attività operative, senza interruzioni di processi e senza modifiche di procedure significative.

Sono inoltre elencate le misure aziendali per la prevenzione e il contenimento della diffusione del virus, in termini di misure di riorganizzazione del lavoro del personale operativo e non operativo, nonché modalità di accesso al sito e di contrasto e contenimento del virus in applicazione dei protocolli COVID-19.

Il documento si conclude con le lezioni apprese dalle attività ispettive, con attenzione alle non conformità emesse in merito al rispetto delle frequenze della formazione, ai contenuti delle attività formative svolte in modalità a distanza, alla consultazione dei rappresentanti dei lavoratori e al rispetto dei tempi/frequenze delle attività di manutenzione. Vengono infine esplicitati i punti di forza e i benefici della nuova modalità ispettiva, consentendo così di garantire la prosecuzione dell'attività di controllo.

Keywords: Sistema di Gestione della Sicurezza, Ispezioni, COVID, continuità, monitoraggio, remoto, industria di processo.

1. Introduzione

L'articolo è finalizzato a rappresentare le attività di controllo e monitoraggio dei siti industriali, svolte durante il periodo COVID-19 [1], con particolare riferimento alle ispezioni sul SGS (Sistema di Gestione della Sicurezza) degli stabilimenti industriali

soggetti agli obblighi del d.lgs. 105/2015 (Decreto italiano di recepimento della Direttiva 2012/18/UE, c.d. "Seveso III") [2]. L'emergenza sanitaria da SARS-CoV-2 ha comportato limitazioni nell'effettuazione di sopralluoghi sul territorio nazionale. Partendo da questo problema, l'Istituto Nazionale per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ispra - Istituto Superiore Protezione e Ricerca Ambientale), il Corpo Nazionale Vigili del Fuoco (CNVVF), l'Istituto per la prevenzione degli infortuni e la sicurezza sul lavoro (INAIL - Istituto Nazionale Assicurazione Infortunio sul Lavoro) e il Ministero dell'Ambiente (MASE, ex MATTM), in ottemperanza alla procedura standard prevista dal decreto, hanno introdotto una modalità alternativa per garantire la continuità delle attività ispettive del SGS [3]. Essa dà la possibilità di svolgere alcune fasi da remoto, individuando cosa si può svolgere tramite esame documentale e cosa in loco, con eventuale completamento dell'analisi documentale. Il lavoro svolto ha permesso di sviluppare questa specifica procedura partendo da importanti riferimenti di organismi e istituzioni internazionali, quali CCPS [4], OSHA [5] e altri [6].

2. La nuova procedura per le ispezioni SGS

2.1 Le nuove fasi delle ispezioni

La nuova procedura per lo svolgimento delle ispezioni SGS presso gli stabilimenti Seveso, come illustrato nello schema in appendice alla presente memoria, si compone di tre fasi:

- Fase I - Preparazione dell'ispezione.
- Fase II - Avvio dell'ispezione.
- Fase III - Conclusione dell'attività di controllo.

La prima fase dell'ispezione è propedeutica, attraverso l'acquisizione della documentazione relativa allo stabilimento da ispezionare.

Le informazioni necessarie per lo svolgimento dell'ispezione sono acquisite dalla Commissione ispettiva almeno attraverso:

- L'acquisizione della documentazione relativa allo stato dello stabilimento da parte delle Autorità Competenti (AA.CC.).
- L'acquisizione del formato previsto dal d.lgs. 105/2015 per l'ispezione Seveso (check list, schede per l'analisi dell'esperienza operativa, tabella eventi-misure per l'analisi dei sistemi critici).
- Ogni ulteriore documentazione relativa allo stabilimento, rilevante per le attività da svolgere.

La Commissione procede all'esame tecnico preliminare della documentazione inviata dal gestore del sito, tramite posta elettronica certificata, individuando preventivamente, in vista della Fase II, i punti della check list e gli eventuali ulteriori aspetti verificabili mediante un esame documentale e/o richiedere uno specifico controllo in loco.

Questa è una fase in cui la Commissione predispone le attività, acquisendo la documentazione di stabilimento e comunicando al gestore l'iter ispettivo e l'avvio. È

prevista una pre-analisi consistente nell'individuazione dei punti della check list, di natura 'documentale', e dei punti da controllare in loco; poi, c'è una prima verifica dei punti 'documentali', con l'individuazione di quelli da approfondire con il gestore nella fase due.

La seconda fase consiste nell'attività di revisione e analisi documentale dell'esperienza operativa e dei punti della check list, che deve tenere conto dei riscontri documentali, richiesti al gestore e acquisiti tramite posta certificata.

L'analisi dei sistemi tecnici critici avviene con l'esame della check list per il "controllo operativo" e la "pianificazione delle emergenze" e prende successivamente in considerazione i test di funzionalità da effettuare durante la visita in loco.

La verifica documentale viene effettuata da remoto tramite videoconferenza (VdC).

È un importante momento di confronto con l'azienda:

- Per i necessari chiarimenti/approfondimenti sui dati acquisiti.
- Per l'analisi congiunta delle schede di analisi dell'esperienza operativa, della check list e della tabella eventi-misure.
- Di individuazione ed esame programmato dei sistemi tecnici, organizzativi e gestionali applicati nello stabilimento.

In questa seconda fase, si pianifica il sopralluogo e si danno le prime conclusioni, in termini di:

- Individuazione di punti specifici da verificare in loco.
- Organizzazione di sopralluoghi in campo.
- Colloquio con il Manager del reparto H&S (Health & Safety) e il medico del lavoro.
- Verbale delle attività svolte in VdC.
- Redazione preliminare del Rapporto Finale di Ispezione (RFI).

Successivamente, l'ispezione procede con la visita in loco e la raccolta di tutte le evidenze per completare la verifica documentale, anche attraverso azioni specifiche e mirate, inclusa l'acquisizione di ulteriore documentazione.

È possibile riassumere quest'ultima fase attraverso:

- Chiarimenti e integrazioni attraverso incontri "in presenza" con il gestore (e/o suoi rappresentanti).
- Colloqui con i rappresentanti dei lavoratori, medico del lavoro, personale interno e subappaltatori.
- Sopralluogo su impianti e attrezzature e relativo stato dei luoghi, predisposizione di simulazioni ed esercitazioni di emergenza, collaudi funzionali degli impianti tecnici, feedback sui sistemi tecnico-impiantistici.

Il sopralluogo in campo e la presenza in impianto vengono effettuati per il tempo minimo necessario.

Da remoto è possibile scrivere uno o più verbali, che riassumano le attività svolte.

Per la visita in loco, per quanto prevedibile, verrà redatto un piano preventivo sufficientemente dettagliato in base al tempo delle attività in loco da svolgere "in presenza" (presso la sala riunioni aziendale).

In analogia a quanto già previsto nella procedura standard, tutti i rilievi emersi nel corso dell'ispezione (sia relativi all'analisi documentale che al sopralluogo) devono essere portati all'attenzione del Gestore al momento della loro presa d'atto e riportati nel RFI unitamente ai riferimenti documentali, al fine di giustificare adeguatamente eventuali non conformità.

In particolare, la Commissione deve garantire che le non conformità siano documentate in modo chiaro e conciso e siano supportate da riscontri oggettivi.

Terminate le attività di esame documentale e di sopralluogo, nella terza fase si completa la redazione del verbale finale di sopralluogo, dopodiché le non conformità riscontrate vengono esposte al gestore in un incontro finale in VdC, accertandosi che queste siano chiaramente comprese.

La redazione di uno o più verbali avviene a distanza in cui, in sintesi, vengono riportate le attività svolte. In ogni caso, l'ultimo verbale sancisce il completamento delle attività e la comunicazione al gestore degli esiti dell'ispezione con evidenza delle non conformità riscontrate.

2.2 Ulteriori obblighi e informazioni necessarie

Il gestore deve assicurare la possibilità di svolgere tali attività "in presenza", attraverso l'adozione di specifiche misure di prevenzione e contenimento della diffusione del virus SARS-CoV-2.

Egli deve fornire informazioni preliminari, alla Commissione, per l'accesso e la permanenza in sicurezza negli ambienti individuati per lo svolgimento dell'attività di controllo, in conformità alla normativa e ai protocolli previsti.

La commissione richiede preventivamente ulteriori informazioni sullo stato dello stabilimento in condizioni di pandemia, ed in particolare indicazioni di eventuali modifiche o integrazioni alle procedure del SGS a seconda della situazione emersa e in relazione a:

- Eventuali provvedimenti di riorganizzazione del lavoro adottati e all'eventuale revisione delle attività formative, anche con riferimento agli obblighi previsti dalla normativa vigente.
- Valutazione dei rischi connessi ad eventuali stati di inoperatività o ridotta operatività degli impianti, legati anche alla presenza di sostanze pericolose.
- Gestione delle attività manutentive secondo il programma pianificato.
- Gestione delle attività di manutenzione dei sistemi tecnici critici, come individuati nell'analisi dei rischi.
- Piano di Emergenza Interna (PEI) e sua attuazione, con riferimento agli eventi da gestire in eventuali situazioni di limitata disponibilità di personale o assenza di personale (attività di vigilanza).
- Composizione della squadra di intervento, in risposta alle emergenze.

3. Casi studio dall'industria di processo

3.1 Informazioni sullo stato dello stabilimento in condizioni di pandemia

Sulla base delle esperienze desunte dalle attività ispettive condotte nel periodo della pandemia su industrie di processo come centri di estrazione/processo di greggio e raffinerie, considerate attività strategiche dalla normativa italiana emanata durante il periodo COVID [7], sono fornite informazioni sullo stato di questi stabilimenti.

Non si sono verificate interruzioni dei processi produttivi o delle attività lavorative, attraverso una generale prosecuzione delle attività operative degli impianti.

Nessuna conseguenza è stata evidenziata sugli scenari incidentali ipotizzati nel Rapporto di Sicurezza, con la successiva conferma dell'attuazione delle misure previste dal Piano di Emergenza Interno. Viene infatti costantemente garantita la presenza di figure aventi specifici ruoli nel Piano di Emergenza Interno, in funzione delle responsabilità individuate.

È stata quindi garantita la composizione giornaliera delle squadre di emergenza presenti sul sito, secondo gli scenari tratti dal Rapporto di Sicurezza.

La continuità gestionale delle attività di stabilimento è stata assicurata, senza interruzioni dei processi e non sono state adottate modifiche o integrazioni a procedure SGS significative.

È stata invece aggiornata la documentazione in ottemperanza alla normativa sulla "sicurezza sul lavoro", per effetto delle nuove modalità di presenza del personale in sito. L'unica riduzione della presenza del personale e delle attività svolte è stata quella delle ditte terze.

Si può comunque affermare che le attività connesse all'esercizio in sicurezza degli impianti sono state assicurate.

3.2 Misure aziendali per la prevenzione e il contenimento della diffusione del virus

Le aziende hanno previsto misure di riorganizzazione del lavoro per il personale operativo e non operativo.

Il personale operativo di produzione, operante su 3 turni da 12 ore, è stato riorganizzato su turni da 12 ore, con riduzione delle alternanze giornaliere negli stabilimenti e minimizzazione dei cambi turno giornalieri. I gestori hanno proceduto all'individuazione di gruppi omogenei di turnisti (organizzati in squadre), isolati in casa, come riserve in caso di contagi dei gruppi rimasti in turno.

Per il personale non operativo è prevista l'implementazione della modalità del telelavoro (smart working) estesa a quadri, dirigenti, lavoratori a giornata (60% dell'organico).

Le aziende hanno implementato nuove procedure di accesso al sito con percorsi di ingresso e uscita dedicati, mantenendo una distanza di 1 m per il personale, previo controllo tramite termoscanner (divieto di ingresso se temperatura eccede i 37,5 °C). Presso gli impianti sono stati predisposti interventi organizzativi, quali la separazione della zona spogliatoi, la diversificazione degli orari di accesso alle mense aziendali.

Per quanto riguarda gli ambienti chiusi, è stata assicurata la sanificazione e sono state distribuite apposite mascherine con l'attuazione di una procedura specifica per il mantenimento delle loro caratteristiche. Infine, ma non meno importante, gli incontri "in presenza" sono stati evitati utilizzando la videoconferenza.

I gestori hanno infine emanato misure di contrasto e contenimento del virus in applicazione dei protocolli COVID-19 e dei "Piani di Contingenza", in accordo con le Organizzazioni Sindacali dei lavoratori, consistenti in:

- Gestione di potenziali casi positivi asintomatici.
- Monitoraggio dei contatti stretti in azienda.
- Esecuzione di screening per il rilevamento di potenziali casi di positività al virus e prevenzione di possibili infezioni.
- Possibilità di "tampone rapido" per l'ingresso in stabilimento e/o per personale proveniente dall'estero (in caso di aziende multinazionali).
- Possibilità di ospitare il personale, per tutta la durata della rotazione turni e/o quarantena, presso strutture ricettive del territorio limitrofo (in caso di aziende multinazionali).

3.3 Informazioni sulle principali risultanze emerse

Sono nel seguito riassunte le principali informazioni riguardanti le attività condotte, in termini di non conformità emerse, secondo le definizioni del D.Lgs. 105/2015 (Raccomandazioni - R; Proposte di prescrizione - P), a carattere quali-quantitativo.

| Elemento del SGS | Tipologia di stabilimento | | | | | | | |
|--------------------------|-----------------------------|---|-----------------------------|---|-----------------------|---|-----------------------|---|
| | Centro estrazione greggio 1 | | Centro estrazione greggio 2 | | Raffineria petrolio 1 | | Raffineria petrolio 2 | |
| | R | P | R | P | R | P | R | P |
| Documento PPIR | x | x | x | | x | x | x | |
| Organizzazione/personale | x | x | x | x | x | | x | |
| Pericoli rilevanti | x | | | | x | | | |
| Controllo operativo | x | x | x | | x | | | |
| Gestione modifiche | x | | x | | x | | | |
| Pianificazione emergenza | x | x | x | x | x | | x | |
| Controllo prestazioni | x | | x | | x | | | |
| Controllo e revisione | x | | | | x | | | |

Tabella 1. Informazioni riguardanti le non conformità emerse

4. Conclusioni

Sulla scorta di quanto indicato al par. 3.3, è possibile evidenziare alcune lezioni apprese, frutto dell'esperienza dalle attività di ispezione SGS svolte, con riferimento alle non conformità in merito alla continuità gestionale durante la pandemia, quali:

- Rispetto delle frequenze orarie per le sessioni di formazione e aggiornamento.
- Spiegazione dei contenuti delle attività formative svolte in modalità “a distanza”, con sessione di verifica finale (“in presenza”).
- Consultazione dei rappresentanti dei lavoratori sulla documentazione obbligatoria prevista dal d.lgs. 105/2015 (DPPIR – Documento di Politica di Prevenzione degli Incidenti Rilevanti, programma di formazione, PEI).
- Rispetto delle tempistiche e della periodicità delle ispezioni su alcuni impianti tecnici critici, eseguite da personale di società terze.
- Verifiche e controlli soggetti al solo effettivo esercizio.

La nuova modalità ispettiva per le ispezioni SGS ha garantito la prosecuzione dell'attività di controllo sui siti Seveso durante l'emergenza sanitaria da SARS-CoV-2. È importante esplicitare i punti di forza e i vantaggi della nuova procedura, che consente un completo controllo documentale preliminare con una conseguente spinta verso la dematerializzazione.

Inoltre, il maggior numero di incontri a distanza con gestore e rappresentanti aziendali (4/5 giorni) rispetto alle precedenti attività svolte solo in sede (nelle sale riunioni aziendali) ha dato più tempo per la redazione del RFI.

La minimizzazione delle visite in loco e la riduzione degli incontri in presenza (solo 1/2 giorni in sede) ha quindi garantito la sicurezza e la tutela della salute nel rispetto dei protocolli COVID-19, con un risparmio economico e umano per la Pubblica Amministrazione e anche per le aziende.

Bibliografia

[1] TWG 2. Technical Working for Seveso Inspections. Seveso Enforcement and Site Risk Management during the Covid-19 Pandemic. EC-Joint Research Centre with the TWG 2 Steering Committee. 9 February 2021 (https://minerva.jrc.ec.europa.eu/EN/content/minerva/4a05d451-6c54-11eb-9867-0050563f0167/webinar_on_seveso_enforcement_and_site_risk_management_during_the_covid19_pandemic_2021).

[2] GU. DECRETO LEGISLATIVO 26 giugno 2015, n. 105. SO n. 161 del 14 luglio 2015 “Attuazione della direttiva 2012/18/UE relativa al controllo del pericolo di incidenti rilevanti connessi con sostanze pericolose”. (Gazz. Uff. 14 luglio 2015, n. 161, S.O.).

[3] CNVVF-MI. Direzione Centrale per la Prevenzione e la Sicurezza Tecnica. Protocollo n. 9143 del 09/07/2020 – DCPREV. “Criteri per lo svolgimento delle ispezioni di cui all'art. 27 del D.LGS. 105/2015 mediante l'uso di tecnologie audio/video per la comunicazione a distanza”.

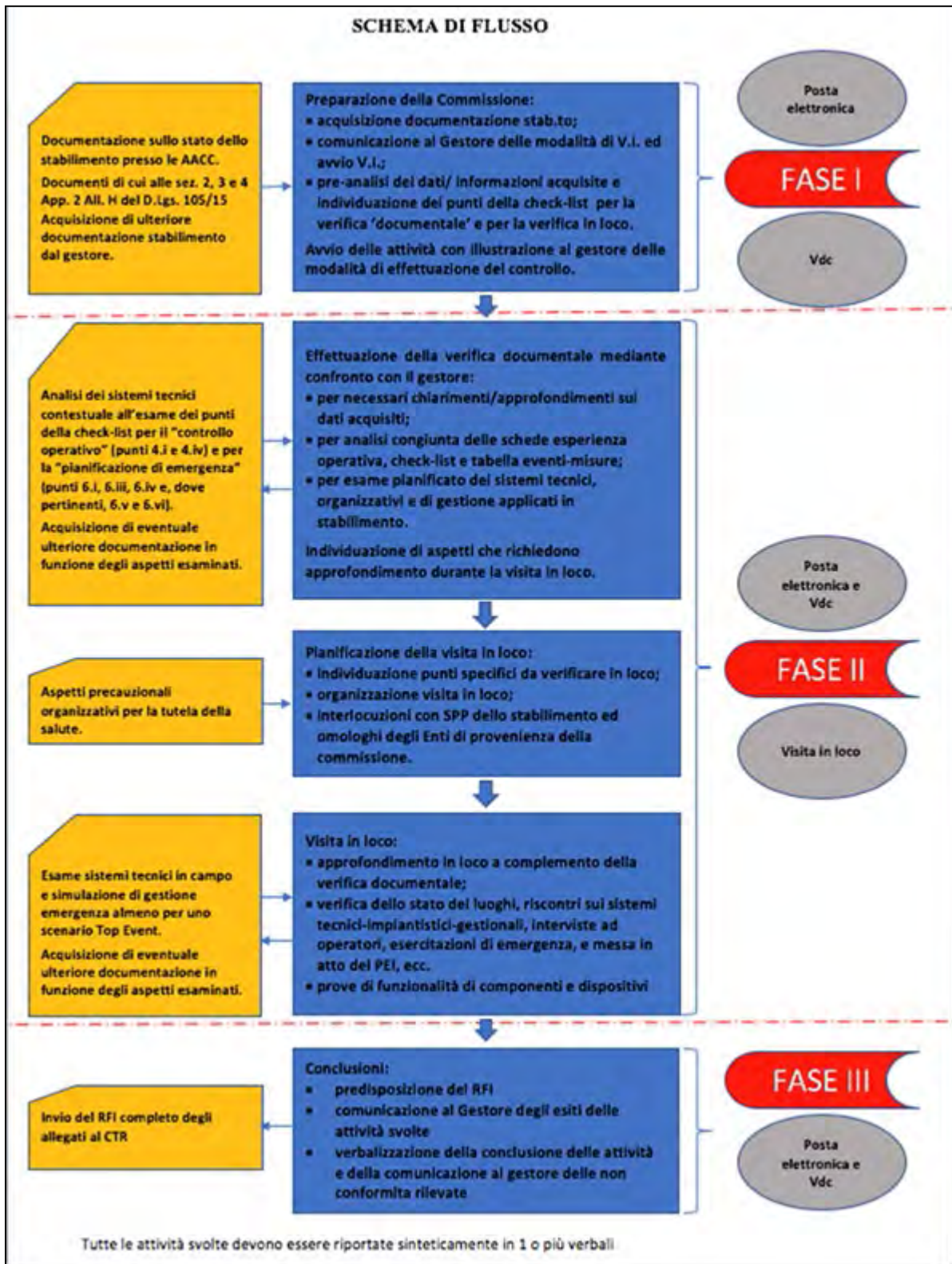
[4] CCPS. Center for Chemical Process Safety “Monograph: RISK BASED PROCESS SAFETY DURING DISRUPTIVE TIMES”. American Institute of Chemical Engineers, New York, NY, 2020 (https://www.aiche.org/sites/default/files/docs/pages/2020-2021_ccps_annual_report.pdf).

[5] OSHA. Occupational Safety and Health Administration "Guidance on Preparing Workplaces for COVID-19". U.S. Department of Labor. Occupational Safety and Health Administration. OSHA 3990-03 2020 (<https://www.osha.gov/sites/default/files/publications/OSHA3990.pdf>).

[6] SEPA. Scottish Environment Protection Agency. "Control of major accident hazards (COMAH). Temporary Regulatory Guidance Response to COVID-19. Position Statement Withdrawn". SEPA 2020 (<https://cedrec.com/legislation/49378/overview>).

[7] GU. DECRETO DEL PRESIDENTE DEL CONSIGLIO DEI MINISTRI 26 aprile 2020 "Ulteriori disposizioni attuative del decreto-legge 23 febbraio 2020, n. 6, recante misure urgenti in materia di contenimento e gestione dell'emergenza epidemiologica da COVID-19, applicabili sull'intero territorio nazionale". (GU Serie Generale n.108 del 27-04-2020).

Appendice: Schema di flusso della nuova procedura ispettiva



Descrizione di un ciclo energetico totalmente green alla luce delle ultime evoluzioni tecnologiche

A. Romanelli¹, A. Serra², F. Praolini³, M. Geneletti³

¹ Inail – Uot di Bergamo

² ATS Brescia

³ Tenaris SPA

Abstract

Il presente lavoro vuole essere una semplice descrizione di un ciclo energetico totalmente green, che partendo dall'energia elettrica prodotta tramite fonti rinnovabili, permette la creazione di idrogeno verde tramite elettrolizzatori e il suo successivo impiego nei più svariati ambiti, compreso quello di abbinarlo alla CO₂ recuperata dalle aziende emettitrici o da stoccaggi allo scopo realizzati, per creare alla fine il metano sintetico secondo la reazione di Sabatier. Ciò allo scopo di sensibilizzare e rendere edotta la collettività sulle nuove tecnologie introdotte o in fase di introduzione al fine di raggiungere l'obiettivo dell'EU di zero emissioni di CO₂ entro il 2050. Infine, viene descritta l'esperienza di implementazione dell'idrogeno nel ciclo produttivo di un'azienda siderurgica.

Keywords: fonti rinnovabili, elettrolizzatore, idrogeno, metano sintetico

1. Introduzione

La sofferenza del pianeta è legata alle attività dell'uomo. Secondo lo scienziato e climatologo Johan Rockström, studioso della resilienza dei sistemi complessi, per poter vivere al sicuro sulla Terra, l'umanità deve attenersi a determinati limiti in nove ambiti (*planetary boundaries*): la percentuale di perdita di biodiversità; il livello di acidificazione degli oceani; il tasso di sfruttamento del suolo; il tasso di consumo di acqua dolce; il livello di ozono nell'atmosfera; il cambiamento climatico; il livello di inquinamento chimico; l'equilibrio nei cicli dell'azoto e del fosforo; la quantità di particolato atmosferico.

Se fino agli anni cinquanta l'umanità si trovava ancora all'interno di tutti i nove "confini di sicurezza", negli anni sessanta è stato sorpassato il limite di sostenibilità del ciclo dell'azoto. Il confine sul cambiamento climatico è stato poi superato agli inizi degli anni novanta. Attualmente l'impatto delle attività umane sull'ambiente è evidente anche sulla perdita di biodiversità degli ecosistemi, e si sta rapidamente avanzando verso i limiti di sostenibilità per quanto riguarda lo sfruttamento del suolo, del fosforo e l'acidificazione degli oceani. Se in così poco tempo tanti confini di sicurezza sono saltati sulla Terra, una delle principali cause è l'utilizzo dei combustibili fossili, che sono stati la fonte di energia alla base dello sviluppo economico nel Novecento. Il

riscaldamento, i trasporti e l'industria, l'abbattimento delle foreste per l'allevamento del bestiame o la coltivazione, la produzione di cemento e altri processi industriali hanno immesso nell'atmosfera 2200 miliardi di tonnellate di CO₂ e altri gas serra, con un effetto tossico a due livelli. Il primo è che i gas serra trattengono il calore del sole, riscaldando il pianeta. Il secondo è che la combustione di carbone e petrolio contribuisce all'inquinamento dell'aria, con rilascio di ossidi di azoto e di microparticelle dagli effetti per la salute.

2. Modalità operative

Ci sono soluzioni tecnologiche che possono mitigare questi scenari, aiutandoci a conservare la carbon budget (figura 1). Sono le soluzioni che tolgono CO₂ dall'atmosfera. La prima tra tutte è la cattura, lo stoccaggio e il riutilizzo della CO₂ (carbon capture use and storage - CCUS) [1] [2].

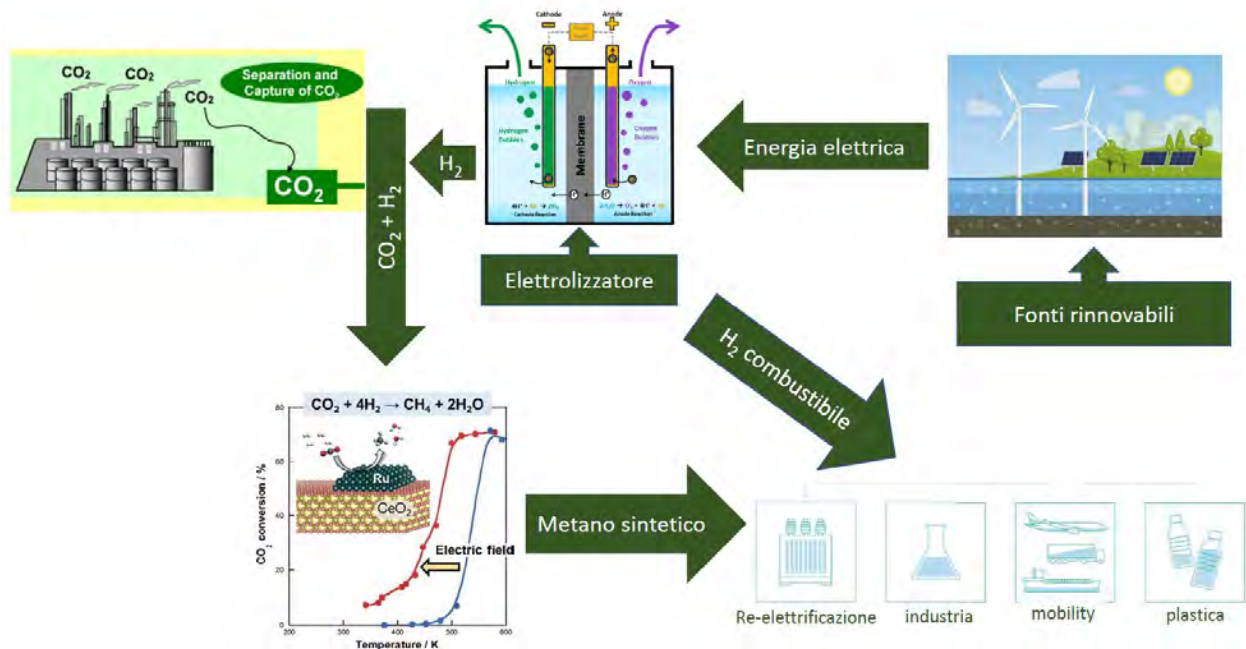


Figura 1. Rappresentazione schematica del ciclo energetico totalmente green.

È possibile catturare flussi concentrati di CO₂ direttamente dalle fabbriche e dalle centrali termoelettriche e conservarla per poi riutilizzarla. Vediamo di descrivere un ciclo che possa permettere la realizzazione di energia elettrica, idrogeno e metano in maniera totalmente green.

2.1 Fonti rinnovabili

Energia rinnovabile definizione: Il termine energia rinnovabile indica tutte le fonti di energia non soggette ad esaurimento e con un limitato impatto ambientale. Le principali sono:

energia solare: sarà il settore trainante con una crescita stimata pari al 60% tra il 2019 e il 2024 con un significativo impiego nel settore industriale e commerciale. Al tempo

stesso, gli studiosi ipotizzano il raddoppio del numero di impianti solari a servizio delle abitazioni entro il 2024.

energia eolica: grazie ai numerosi incentivi proposti dagli stati, la sua produzione aumenterà del 57% in Cina e negli USA.

energia idroelettrica: rimarrà la più grande fonte di energia rinnovabile anche nel 2023, provvedendo fino al 46% del fabbisogno energetico dell'Italia.

energia da biomasse: viene ipotizzato una crescita molto importante, tale da soddisfare fino al 32% del fabbisogno energetico totale mondiale [3].

2.2. Elettrolizzatore

Un elettrolizzatore (o cella elettrolitica) è un dispositivo elettrochimico che, alimentato da energia elettrica, consente, in presenza di un elettrolita e di una membrana, di rompere le molecole dell'acqua, separando l'idrogeno dall'ossigeno (figura 2).

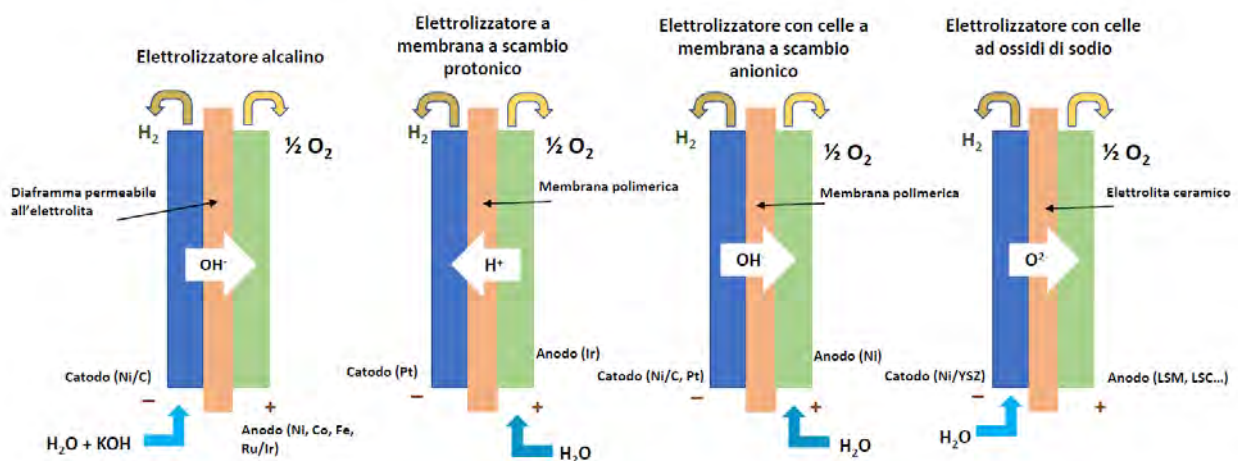


Figura 2. Struttura della cella per le quattro principali tecnologie di elettrolisi.

La diffusione del processo di elettrolisi per la produzione dedicata di idrogeno è cresciuta a un ritmo sostenuto negli ultimi anni. L'anno scorso è stato un anno record di diffusione dell'elettrolisi, con oltre 200 MW di capacità entrati in funzione, un aumento di tre volte rispetto al 2020. La capacità installata totale ha raggiunto 1 GW alla fine del 2022. La realizzazione di tutti i progetti in cantiere potrebbe portare a una capacità installata di elettrolizzatore di 134-240 GW entro il 2030, il doppio delle aspettative rispetto allo scorso anno. Inoltre, la capacità di produzione di elettrolizzatori è raddoppiata rispetto al 2022, raggiungendo quasi 8 GW all'anno. Tuttavia, la capacità di elettrolisi richiede un'accelerazione significativa per un adeguamento allo scenario Net Zero Emissions entro il 2050. Ciò richiede di arrivare ad una capacità di elettrolisi di oltre 700 GW entro il 2030 come evidenziato nella tabella 1 [4].

| Anno | MW Alcalino | MW PEM | MW Altro/sconosciuto | MW Totali |
|------------|-------------|--------|----------------------|-----------|
| 2019 | 164 | 65 | 13 | 242 |
| 2020 | 197 | 93 | 14 | 304 |
| 2021 | 354 | 126 | 33 | 513 |
| 2022 | 727 | 366 | 306 | 1398 |
| 2023 | 1459 | 1125 | 2933 | 5517 |
| 2030 - NZE | - | - | - | 720.000 |

Tabella 1. Capacità totale di elettrolisi installata per tecnologia nello scenario Net Zero, 2019-2050. Fonte: IEA Hydrogen Projects Database. NZE = Scenario Net Zero Emissions entro il 2050.

2.3 Emittitori di CO₂ e contemporaneamente potenziali fornitori di tecnologie per la cattura di CO₂



- ✓ *Produzione di energia:* biogas (BECCS), biomassa (BECCS), waste to energy (BECCS), carbone (non biogen CO₂), petrolio (non biogen CO₂) - Cattura direttamente dalle ciminiere;
- ✓ *Industria pesante:* cementifici, siderurgici, saccariferi, termotecniche, settore chimico – cattura direttamente dalle ciminiere;
- ✓ *L'atmosfera:* Cattura diretta dell'aria.

2.4 Infrastrutture per il trasporto della CO₂



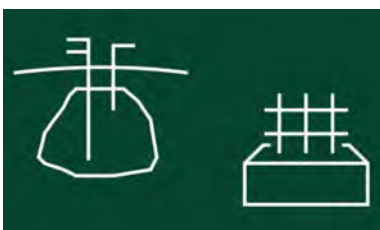
- ✓ Collegamento di condutture in superficie o sotterranee;
- ✓ Trasporto via nave;
- ✓ Trasporto via terra tramite camion o treno.

2.5 Utilizzo della CO₂



- ✓ Produzione di combustibili sintetici quali il metano verde (CH₄);
- ✓ Trasformazione biologica in acido carbossilico per ingredienti in foraggi e alimenti;
- ✓ Trasformazione chimica in polimeri, combustibili, materiali da costruzione, solventi.

2.6 Immagazzinaggio della CO₂

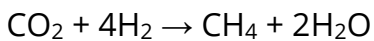


- ✓ *Geologico:* giacimenti di petrolio e gas esauriti, riserve di acqua salata, caverne;
- ✓ *Minerale:* stoccaggio in prodotti minerali, ad esempio calcestruzzo;
- ✓ *Biologico:* stoccaggio in materiale biologico, ad esempio rimboschimento;
- ✓ *Biochar:* biomassa residua carbonizzata.

2.7 Idrogenazione- utilizzo dell'anidride carbonica per la generazione di metano

L'idrogenazione svolge un ruolo chiave nella sintesi chimica. L'idrogenazione omogenea è diventata sempre più importante negli ultimi decenni, principalmente a causa della sua applicazione nella produzione industriale di specialità chimiche. L'idrogenazione omogenea è una trasformazione chimica durante la quale uno o più atomi di H vengono incorporati nel prodotto della reazione, per azione di un catalizzatore attivo presente nella stessa fase dei reagenti.

L'idrogeno (H₂) è la molecola più semplice e le sue proprietà sono completamente comprese. Poiché questa risorsa pulita è disponibile in abbondanza a un costo molto basso, l'idrogenazione catalitica è una tecnologia fondamentale sia nella ricerca che nell'industria. Tipico è il processo Sabatier, cioè una reazione chimica in cui il diossido di carbonio reagisce con l'idrogeno, in presenza di nichel quale catalizzatore e in condizioni di temperatura ottimale compresa tra 300-400 °C e alta pressione, producendo metano e acqua. Occasionalmente viene utilizzato anche un catalizzatore a base di rutenio supportato su allumina, più costoso ma anche più efficiente. L'equazione chimica è la seguente:



Recentemente gli scienziati giapponesi dell'Università di Waseda [5] hanno sviluppato un nuovo metodo per convertire l'anidride carbonica in metano con un campo elettrico a basse temperature. Rispetto ai metodi precedenti, questo nuovo metodo può produrre qualsiasi quantità di metano ogni volta che è necessario. Il metano, quale componente principale del gas naturale, può essere utilizzato per generare calore ed elettricità; quindi, questo metodo potrebbe essere utilizzato per riciclare CO₂ indefinitamente (Figura 3).



Figura 3. L'idrogenazione della CO₂ in CH₄ procede sul catalizzatore Ru/CeO₂ in un campo elettrico anche a basse temperature inferiori a 473,15 K (200 °C), dove la reazione catalitica convenzionale senza il campo elettrico non procede. Nel campo elettrico, il catalizzatore Ru/CeO₂ mostra un'attività elevata e stabile senza l'ostacolo del CO adsorbito sulla superficie delle particelle Ru.

3. RecHycle: Utilizzo dell'idrogeno verde per la neutralità climatica dell'industria siderurgica. Esperienza di un'azienda siderurgica

L'industria siderurgica è uno dei principali responsabili delle emissioni di CO₂, con oltre il 7% delle emissioni. Circa il 67% dell'acciaio globale viene prodotto attraverso il metodo *Blast Furnace-Basic Oxygen Furnace* (BF-BOF), in cui il carbone viene utilizzato come combustibile per riscaldare l'altoforno e come agente riducente per convertire il minerale di ferro in acciaio. Quando il carbonio si combina con l'ossigeno, l'anidride carbonica viene rilasciata come co-prodotto, motivo per cui le emissioni di CO₂ rappresentano parte integrante della produzione di acciaio convenzionale. In questo contesto si inserisce il progetto europeo *RecHycle* [6] che mira a studiare l'uso dell'idrogeno (verde) e dei gas riciclati per sostituire il coke ed il carbone polverizzato nell'altoforno delle acciaierie. Infatti, quando l'idrogeno reagisce con il minerale ferroso, come co-prodotto si forma solo vapore acqueo, eliminando l'emissione di CO₂. RecHycle è finanziato nell'ambito del bando HORIZON-CL4-2021-TWIN-TRANSITION-01-22 di Horizon Europe, il programma quadro dell'Unione Europea per la ricerca e l'innovazione (accordo di sovvenzione n. 101058692). In tema di decarbonizzazione e miglioramento dell'impronta ambientale un caso concreto è l'ambizioso progetto lanciato da un'azienda del territorio Bergamasco. A inizio 2022 le società hanno sottoscritto un Memorandum of Understanding (MoU) per poter avviare la progettazione di un impianto di cattura di CO₂ (CCU) nello stabilimento in questione.

L'innovativo progetto prospetta la cattura di 30 tonnellate giornaliere di CO₂ prodotte direttamente dalla centrale termoelettrica dello stabilimento. Il processo di cattura dell'anidride carbonica avverrà per mezzo di una rivoluzionaria tecnologia proprietaria di Saipem CO₂ Solutions, basata su un processo enzimatico che consentirà l'impiego di calore di scarto evitando così di ricorrere a sostanze tossiche che verrebbero impiegate in altri processi. La CO₂ così raccolta verrà poi utilizzata da un'altra azienda del territorio specializzata nella produzione e distribuzione di gas tecnici, nello specifico nell'ambito dell'industria alimentare, nelle coltivazioni, nel trattamento delle acque, nella lavorazione dei metalli e anche come gas refrigerante a ridotto impatto ambientale. Il recupero e un nuovo utilizzo dell'anidride carbonica raccolta contribuirà allo sviluppo di modello economico circolare, sempre più sostenibile [7]. Il progetto Dalmine Zero Emissions (DZE) mira a sostituire il gas naturale con idrogeno verde da utilizzare nell'intero ciclo produttivo dei tubi in acciaio, dall'acciaieria del forno ad arco elettrico (EAF) ai trattamenti termici. Verranno installati elettrolizzatori in loco alimentati da elettricità rinnovabile per fornire idrogeno verde agli impianti e l'ossigeno generato come sottoprodotto dell'elettrolisi, verrà utilizzato direttamente nel ciclo di produzione dei tubi in acciaio anziché acquistarlo da terzi. Questo progetto prevede:

- Sistema multifunzione (bruciatori e iniezione di ossigeno) a parete raffreddato ad acqua EAF funzionante con miscela variabile NG-H₂ fino al 100% H₂;

- Sistemi di combustione policombustibile ad alta efficienza Ultra-Low NOX funzionanti con miscela variabile GN-H₂ fino al 100% H₂.

Il progetto Dalmine Zero Emissions è altamente modulare e interconnesso. Due diverse fasi saranno implementate in sequenza, considerando la migliore soluzione tecnologica disponibile e il contesto (es. installazione di elettrolizzatori aggiuntivi o acquisto di idrogeno verde dal mercato):

Fase Steelmaking: sostituzione del gas naturale nell'EAF da completare entro 2-3 anni. Prevede l'installazione di un elettrolizzatore da 20MW. Inoltre, grazie all'utilizzo diretto dell'ossigeno generato dall'elettrolizzatore in EAF, consentirà un risparmio di circa 5 kton CO₂/anno. L'impiego dell'idrogeno nell'acciaieria sarà seguito da un lungo periodo di test per verificare gli effetti dell'idrogeno sulla qualità dell'acciaio e sul materiale refrattario.

Phase Downstream: sostituzione del gas naturale in tutti i forni di riscaldamento e trattamento termico in fasi sequenziali. Prevede l'installazione di ulteriori elettrolizzatori e l'ulteriore riduzione delle emissioni dirette di CO₂ dell'impianto.

Dalmine Zero Emissions punta ad una rilevante decarbonizzazione del proprio sito con circa il 75% di abbattimento totale di CO₂, al suo completamento. Il livello di circolarità aumenterà (EAF consuma una quantità > 90% di materiali riciclati) con l'uso interno di O₂ generato dagli elettrolizzatori.

3.1 Sfide chiave

Il settore siderurgico è ad alta intensità di capitale e opera in un mercato globale altamente competitivo. Il ciclo di investimento dura approssimativamente tra i 20 e 30 anni. Le sfide provengono principalmente da:

- problematiche interne relative all'utilizzo dell'idrogeno, alla flessibilità del processo e alla qualità finale del prodotto siderurgico;
- problemi sistemici legati a fattori esterni e sfide industriali più ampie che circondano l'industria e il mercato dell'acciaio.

3.1 Questioni interne

Il potere calorifico inferiore dell'idrogeno richiede l'utilizzo di una quantità di gas circa tre volte maggiore del gas naturale. I sistemi di combustione e/o i bruciatori esistenti devono essere adattati o sviluppati ad hoc, così come la relativa rete di distribuzione del gas. Deve essere, inoltre, eseguita una valutazione di sicurezza dedicata. In EAF, lo stesso sistema viene utilizzato sia per fondere il rottame che per iniettare ossigeno durante la raffinazione. Questo aspetto deve essere considerato nell'adattamento della modalità di funzionamento del bruciatore. Il gas naturale è anche largamente utilizzato per il preriscaldamento dei refrattari e per l'ossitaglio delle barre d'acciaio. L'introduzione dell'idrogeno come combustibile nella catena siderurgica EAF porterà a diversi cambiamenti che devono essere studiati. Fondamentale è la valutazione degli effetti della nuova atmosfera con quantità ridotta (o eliminata) di CO₂ e quantità aumentata di H₂O sul processo. Inoltre, devono essere considerati gli impatti sulla durata del materiale refrattario (reazioni con H₂ e H₂O, possibili meccanismi di

corrosione, picchi di scambio termico radiativo localmente più elevati) e sulla qualità del semilavorato e del prodotto finito (formazione di incrostazioni nel processo di laminazione a caldo).

Il controllo dei fenomeni delle condizioni di ossidazione che si verificano durante l'operazione di riscaldamento e il processo di laminazione a caldo è un problema persistente e la letteratura disponibile fa riferimento solo alle tecnologie di combustione standard e al gas naturale. La definizione dei parametri di lavorazione ottimali è obbligatoria per garantire un prodotto qualitativamente idoneo e per verificare che gli eventuali difetti di produzione associati, non persistano fino al prodotto finale, anche quando vengono utilizzati nuovi sistemi di combustione e combustibile ad alto contenuto di H₂ (fino al 100%) e nelle operazioni di post-riscaldamento. Inoltre, devono essere attentamente valutati gli effetti di un maggior contenuto di H₂O nei sistemi di captazione dei fumi e nei sistemi di recupero del calore.

3.2 Questioni sistemiche

L'idrogeno oggi è quasi esclusivamente di origine fossile:

- prodotto principalmente tramite il reforming del gas naturale (95%);
- sottoprodotto della produzione di clorurazione per elettrolisi del sale (NaCl);
- prodotto tramite elettrolisi dell'acqua (< 2%) con elettrolizzatori.

L'idrogeno è utilizzato principalmente nei grandi impianti chimici e nelle raffinerie, fornito in serbatoi di stoccaggio o tramite condutture esistenti in aree fortemente industrializzate. La produzione di idrogeno in loco è limitata. Le principali barriere sistemiche allo sviluppo dell'idrogeno verde ancora da abbattere sono:

- tecnologie di combustione ad alto costo non ancora a piena maturità;
- limitata diffusione nel mercato di dimostrazioni dell'intera filiera a dimensione industriale;
- mancanza di un quadro normativo e legislativo chiaro per la produzione e l'uso dell'idrogeno in settori *hard to abate*;
- necessità di un sistema di certificazione per la tracciabilità dell'idrogeno (uno schema di certificazione potrebbe consentire la tracciabilità di tutte le fonti, rinnovabili e non rinnovabili);
- revisione degli oneri di rete e tassazione dell'energia elettrica rinnovabile per la produzione di H₂ verde;
- allineamento del quadro normativo in tutti gli Stati membri dell'UE per il trasporto di idrogeno in pipeline, miscelato con gas naturale (*blending*) o puro.

Confrontando la visione di Carbon Direct Avoidance (CDA) dell'industria siderurgica e le esigenze future con quella attuale, il *business case* rivela che il costo delle FER dovrebbe diminuire sostanzialmente (da 100-80 €/kWh a 30-20 €/kWh) per consentire l'elettrolisi dell'acqua e produzione di idrogeno a costi sostenibili. Inoltre, oggi e nel prossimo futuro, per minimizzare il costo dell'idrogeno, l'elettricità da FER dovrebbe essere generata in prossimità dell'utente, per evitare costi di trasmissione e tassazione. Pertanto, l'ubicazione per l'installazione, l'integrazione nell'ecosistema

locale e la flessibilità operativa degli impianti, possono essere considerati uno dei principali fattori critici per il progetto FID (mantenimento della competitività in una visione di breve/medio periodo).

Pertanto, la produzione dell'acciaio e i processi a valle (laminazione a caldo, trattamento termico e finitura) richiedono un'implementazione graduale, modulare e di scala.

Un altro fattore limitante per la sostituzione del gas naturale con l'idrogeno verde, oltre alla disponibilità di FER, sono le superfici necessarie per l'installazione di impianti di elettrolisi efficienti da centinaia di MWhe, la rete di distribuzione del gas e la sofisticata logistica necessaria per raggiungere un costo competitivo della produzione di acciaio basata sull'idrogeno. La disponibilità di elettricità verde è cruciale nel percorso di decarbonizzazione, sia per ridurre le emissioni di CO₂ (*Scope 2*) mediante utilizzo diretto, sia (*Scope 1*) per produrre combustibili verdi come idrogeno e ammoniaca, in sostituzione delle fonti fossili. Queste considerazioni richiedono un significativo sostegno pubblico per garantire che le tecnologie disponibili siano implementate superando le seguenti barriere:

Rischio di investimento: la transizione dalla fase pilota all'implementazione su scala industriale richiede un lungo ciclo di investimento, un'elevata intensità di capitale e un mercato globale competitivo;

Infrastrutture esterne: disponibilità di elettricità e idrogeno a zero emissioni di carbonio a basso costo, disponibilità di depositi geologici per lo stoccaggio della CO₂;

Protezione del mercato: assegnazioni di CO₂ esenti da ETS per evitare la delocalizzazione al di fuori dell'UE di industrie ad alta intensità energetica, equo meccanismo di adeguamento del carbonio alla frontiera (CBAM) per evitare la sostituzione della produzione dell'UE con merci importate, aiuti all'esportazione per consentire all'industria dell'UE di continuare a competere a livello internazionale.

3.3 Percorso autorizzativo

L'iter autorizzativo ha riguardato il rispetto delle seguenti normative applicabili: Direttiva Seveso (d.lgs. 105/15), Attività sotto controllo dei Vigili del Fuoco (d.p.r. 151/2011) e Normativa Ambientale (d.lgs. 152/2006).

Direttiva Seveso: la capacità massima prevista di stoccaggio dell'idrogeno è quantificata in circa 10-15 ton, superiore alla soglia minima (5 ton) prevista dalla Direttiva Seveso, ma inferiore alla soglia massima (50 ton). Lo stoccaggio di ossigeno è ben al di sotto della soglia e pertanto non sarà incluso in questa analisi.

L'impianto di produzione e stoccaggio dell'idrogeno sarà classificato come soggetto alla direttiva Seveso come impianto di livello inferiore. Di conseguenza, dovrà essere seguito il seguente iter autorizzativo:

- comunicazione alle autorità competenti secondo gli adempimenti previsti dall'art. 13 e allegato 5;
- realizzazione di una politica di prevenzione degli incidenti rilevanti (articolo 14);

- predisposizione dell'apposito documento di analisi dei rischi (da non trasmettere);
- creazione e diffusione del sistema di gestione della sicurezza per la prevenzione dei grandi rischi (articolo 14 e allegato 3);
- fornire, all'autorità preposta, le informazioni necessarie alla predisposizione del Piano di Emergenza Esterno.

La denuncia dovrà essere presentata 180 giorni prima dell'inizio dei lavori di costruzione del nuovo impianto e sarà valutata dal VVF ai sensi dell'art 3 d.p.r. 151/11. *Attività sotto controllo dei Vigili del Fuoco*: è necessario aggiornare il Certificato di Prevenzione Incendi esistente per il sito di Dalmine. Oltre all'attività principale "51.3.C: Stabilimenti siderurgici e per la produzione di altri metalli; attività comportanti lavorazioni a caldo di metalli, oltre 25 addetti". Include le seguenti attività che dovranno essere incluse:

1.1.C: Stabilimenti ed impianti ove si producono e/o impiegano gas infiammabili e/o comburenti con quantità globali in ciclo superiori a 25 Nm³/h;

2.2.C: Impianti di compressione o di decompressione dei gas infiammabili e/o comburenti con potenzialità superiore a 50 Nm³/h, con esclusione dei sistemi di riduzione del gas naturale inseriti nelle reti di distribuzione con pressione di esercizio ≤ 0,5 Mpa;

4.2.C: Depositi di gas infiammabili in serbatoi fissi compressi per capacità geometrica complessiva superiore o uguale a 0,75 m³;

5.2.C: Depositi di gas comburenti compressi e/o liquefatti in serbatoi fissi e/o recipienti mobili per capacità geometrica complessiva superiore o uguale a 3 m³; (ossigeno già utilizzato in acciaieria);

6.2.B: Reti di trasporto e di distribuzione di gas infiammabili, compresi quelli di origine petrolifera o chimica, con esclusione delle reti di distribuzione e dei relativi impianti con pressione di esercizio non superiore a 0,5 Mpa;

48.1.B: Centrali termoelettriche, macchine elettriche fisse con presenza di liquidi isolanti combustibili in quantitativi superiori a 1 m³ (TBD, in base al tipo e alla dimensione del trasformatore elettrico).

Normativa Ambientale d.lgs. 152/2006 e s.m.i.: l'iter autorizzativo prevede la presentazione del progetto alla VIA (gli enti hanno 90 giorni di tempo per fornire le proprie conclusioni). Non essendo previsti impatti ambientali negativi significativi, il progetto non sarà tenuto a presentare il rapporto di VIA e potrà richiedere l'inclusione dell'impianto di produzione di idrogeno nell'autorizzazione ambientale esistente del sito di Dalmine:

- La produzione di idrogeno è inclusa nell'elenco delle attività specificate nell'allegato I della direttiva: attività 4.2. Produzione di sostanze chimiche inorganiche;
- Dovrà essere presentata una domanda per l'aggiunta di una nuova attività IPPC al permesso IPPC esistente;

- Il rilascio dell'autorizzazione ambientale revisionata dovrebbe avvenire entro 150 giorni dalla presentazione della domanda.

Domanda di concessione edilizia (ai sensi del D.P.R. 6 giugno 2001, n. 380 e successive modifiche ed integrazioni): composta, tra più documenti, da:

- Date di costruzione;
- Documenti tecnici di progetto;
- Studio di fattibilità geologica e geotecnica;
- Impatto ambientale;
- Valutazione dell'impatto acustico (AUA);
- Relazione di valutazione paesaggistica.

In aggiunta a quanto sopra, si precisa che l'H₂ non rientra tra i combustibili consentiti di cui all'allegato X alla parte quinta del d.lgs. 152/2006. Ciò premesso l'Autorità Ambientale Locale incaricata di rilasciare l'autorizzazione aggiornata può rifiutarsi di farlo in quanto l'utilizzo di H₂ come combustibile non è previsto dalla normativa vigente e pertanto è vietato. Infine, nella suddetta analisi dell'iter autorizzativo, non si è tenuto conto dello schema di decreto del Ministero dell'Interno che fisserà le norme di prevenzione incendi da seguire per la produzione, lo stoccaggio e l'utilizzo di H₂. Tale decreto, ancora da emanare, contiene una serie di prescrizioni relative alle distanze minime di sicurezza e ai requisiti per l'installazione di pareti in calcestruzzo che renderanno il passaggio all'H₂ ancora più difficoltoso di quanto già previsto.

4. Riepilogo e conclusioni

Sono in atto, in tutto il mondo, azioni per limitare le emissioni di anidride carbonica derivante soprattutto dalla combustione fossile, con lo scopo principale di bloccare l'aumento della temperatura globale. Ciò deve essere fatto in maniera attenta e consapevole del fatto, che il mondo andrà comunque verso un futuro con un consumo sempre maggiore di energia per rispondere ai fabbisogni delle società più tecnologicamente evolute e di quelle che aspirano ad esserlo. Sarà pertanto indispensabile introdurre nuovi cicli energetici a zero emissioni di CO₂ e, allo stesso tempo, con capacità produttive sempre maggiori. Il ciclo dell'idrogeno e il suo utilizzo massivo potrà essere una delle strade più promettenti se ci si impegnerà a diffondere le conoscenze in questo ambito e gli Stati e le aziende investiranno tralasciando in un primo momento come unico obiettivo esclusivamente il profitto.

Bibliografia

- [1] Rivoluzione idrogeno. La piccola molecola che può salvare il mondo di Marco Alverà, Mondadori editore, anno 2020;
- [2] The Planetary boundaries - Johan Rockström, 2009.
- [3] White papers for a green transition: Carbon capture, utilisation, and storage Picking the high-hanging fruits of CO₂ mitigation.
- [4] Electrolysers – Analysis – IEA report;

- [5] Journal: Chemistry Letters, Title of original article: Low-temperature conversion of carbon dioxide into methane in an electric field - Authors: Kensei Yamada, Shuhei Ogo, Ryota Yamano, Takuma Higo, and Yasushi Sekine DOI: 10.1246/cl.190930
- [6] RecHycle: l'utilizzo dell'idrogeno verde per la neutralità climatica dell'industria siderurgica; Ciarapica, Antomarioni e Leonardo Postacchini;
- [7] Webinar a cura del CNI - Tecniche di produzione e metodi di impiego di idrogeno rinnovabile del 20/07/2023. Relatori: Claudia Bassano ENEA Dipartimento Tecnologie Energetiche e Fonti Rinnovabili.

La gestione del rischio nello stoccaggio energetico mediante batterie agli ioni di litio: i rischi emergenti connessi con gli impianti BESS

L. Fiorentini¹, F. Dattilo², F. Vazzana³

¹ TECSA S.r.l.

² Università di Padova

³ ISPRA

Abstract

Partendo dai criteri di valutazione e gestione tipicamente utilizzati per le analisi quantitative di rischio, estesamente impiegati, in primis per il cosiddetto “rischio industriale”, in una serie di settori indipendentemente dall’assoggettività normativa specifica, ed impiegando le tecniche di analisi preliminare dei pericoli maggiormente utilizzate, è stato possibile fornire una panoramica sui potenziali rischi industriali per la sicurezza e per l’ambiente associabili alle unità BESS ivi inclusi gli effetti indiretti e gli effetti domino. In particolare, si è approfondito il pericolo connesso non solo con l’incendio o l’esplosione ma anche quello derivante dallo sviluppo di dispersioni di vapori in atmosfera (tossici ed infiammabili) oltre che di contaminazione delle acque utilizzate nell’ambito del soccorso tecnico e del controllo dell’incendio mediante presidi fissi posti a protezione delle unità oggetto di incidente e di quelle limitrofe.

Keywords: sistemi di gestione della sicurezza, pericolo di incidente rilevante, analisi dei rischi.

1. Introduzione

Con Battery Energy Storage System (BESS) si intende un dispositivo elettrochimico che può convertire l’energia elettrica in energia chimica o viceversa, a seconda della sua modalità operativa: carica o scarica. La pur recente e breve esperienza operativa di BESS agli ioni di litio evidenzia già una nutrita serie di incidenti anche particolarmente significativi in termini di effetti (tipicamente gli incendi e le esplosioni determinati da run-away termico) che ripropongono con severità la necessità di analisi strutturate di questi rischi emergenti. Si impone quindi, per i gestori di queste sempre più numerose installazioni, la valutazione di tutti i pericoli data la presenza, reale o prevista³, di sostanze pericolose che è ragionevole prevedere che possano essere generate, in caso di perdita del controllo dei processi. Infatti, oltre i precitati effetti, non è assolutamente possibile escludere durante la fase di incidente vero e proprio anche lo svilupparsi di dispersioni tossiche ed infiammabili e durante la fase di gestione della risposta la necessità di

gestione delle acque derivanti dalle azioni di contrasto all'incendio ed all'incremento incontrollato di temperatura. Tutti questi effetti sono già stati registrati, nel mondo, nella esperienza operativa di questa tipologia di impianti oltre che, più in generale, in installazioni ed anche prodotti, contenenti batterie.

1.2 Contesto normativo

Lo stoccaggio di merci pericolose è sottoposto, in relazione alle quantità e alle tipologie di merce, alle norme giuridiche di tutela ambientale (TU Ambiente), di tutela dei lavoratori addetti (D.Lgs. 81/08 e smi), di prevenzione del rischio incendio (Attività soggette) e di prevenzione dei rischi di incidente rilevante (Direttiva "Seveso III", in vigore in Italia attraverso il D.Lgs. 105/2015). In tutti questi casi, la prevenzione dei rischi è affidata alla individuazione sistematica dei pericoli e alla loro gestione, tra cui le misure necessarie per la prevenzione delle incompatibilità chimico-fisiche con sostanze, miscele o articoli, che possono portare ad aggravamenti del rischio. Oltre a quanto sopra è possibile affermare che installazioni BESS costituiscono il più delle volte anche il nucleo centrale di impianti che, per altri asset necessariamente presenti (es. i trasformatori), sono soggetti alla disciplina della normativa in materia di prevenzione incendi (D.P.R. 151/2011). In taluni ulteriori casi ancora i BESS potrebbero essere installati a servizio o all'interno del perimetro di Stabilimenti nuovi ed esistenti essi stessi soggetti a normative specifiche (ad. esempio siti soggetti all'applicazione della Direttiva "Seveso"). Indipendentemente in ogni caso dal contesto normativo di assoggettabilità degli impianti, eventualmente costituito da un combinato dei precitati corpi normativi, è fondamentale osservare che la sicurezza deve essere garantita in tutte le fasi costituenti il ciclo di vita dell'installazione, dalla progettazione fino all'esercizio. Tale traguardo può essere raggiunto e dimostrato unicamente mediante l'adozione di un sistema di gestione della sicurezza nella fase di esercizio.

2. La valutazione del rischio di incendio ed esplosione e le strategie di mitigazione

Dall'esperienza operativa ed incidentale recente appare evidente che le problematiche maggiormente severe sono riconducibili all'instaurarsi di reazioni esotermiche improvvise. Per evitare che le batterie agli ioni di litio vadano incontro a un runaway termico e per mitigarne le conseguenze, in genere vengono attuate diverse misure. Queste strategie mirano a evitare l'innescò della deriva termica, a gestire i sottoprodotti e gli impatti ad essa associati e a fornire un raffreddamento per rallentare la diffusione degli effetti ad altre celle all'interno di un modulo o di un rack. A queste strategie si aggiungono quelle volte ad evitare il coinvolgimento di altri BESS o asset industriali eventualmente nell'intorno del primo BESS coinvolto nell'incidente, al fine di scongiurare medesimi effetti ovvero effetti domino ed effetti secondari sulle installazioni nell'intorno. La sfida per la salvaguardia di un BESS agli ioni di litio risiede nel fatto che presenta un rischio concomitante di incendio ed

esplosione. La maggior parte dei metodi di soppressione degli incendi, come i sistemi sprinkler o gli impianti di protezione attiva del tipo "a diluvio", sono progettati presupponendo il verificarsi di un'accensione. Tuttavia, se l'ESS non si incendia, il rilascio di gas durante il thermal runaway può comunque rappresentare un rischio di esplosione o di flash-fire. Di conseguenza, le strategie di mitigazione convenzionali possono incontrare difficoltà quando si tratta di proteggere le batterie agli ioni di litio ESS, data la continua evoluzione della tecnologia e dei progetti, i rischi unici associati al thermal runaway, gli eventi prolungati, gli obiettivi di protezione non ben definiti e le limitate tecniche di mitigazione comprovate e già sperimentate su sistemi di accumulo di tale tipologia e taglia.

La metodologia "Bow-Tie" è un approccio alla gestione del rischio comunemente utilizzato in vari settori, tra cui quello della sicurezza e della gestione dei rischi industriali. Fornisce una rappresentazione visiva, anche intuitiva, della relazione tra i pericoli, le loro cause, le conseguenze e le misure preventive e di mitigazione in atto.

Il diagramma "Bow-Tie" prende il nome dalla sua forma, che ricorda un papillon nella sua forma espansa. Il diagramma composto da tre elementi principali: il lato sinistro rappresenta le cause o le minacce che possono portare a un evento pericoloso, il nodo al centro rappresenta l'evento stesso e il lato destro rappresenta le conseguenze che possono derivare dall'evento. Il diagramma comprende anche due ali, una per ogni lato del nodo, che rappresentano le misure preventive a sinistra e le misure mitigative a destra. Sul lato sinistro del bow-tie sono raffigurate le misure preventive. Queste misure hanno lo scopo di ridurre la probabilità che l'evento pericoloso si verifichi. Possono includere protocolli di sicurezza, controlli ingegneristici, programmi di formazione o procedure di manutenzione volti a prevenire o ridurre al minimo le cause o le minacce.

Sul lato destro del "Bow-Tie" sono indicate le misure di mitigazione, incluse quelle volte ad evitare potenziali effetti secondari e domino. Queste misure vengono attuate per ridurre al minimo le conseguenze dell'evento pericoloso nel caso in cui si verifichi. La metodologia "Bow-Tie" è uno strumento di analisi prezioso per visualizzare e analizzare i rischi, comprendere le relazioni tra cause, eventi e conseguenze e identificare l'efficacia delle misure preventive e mitigative esistenti. Esso può essere impiegato per una analisi puramente qualitativa sia per una analisi ed una valutazione dei rischi di tipo quantitativo (eventualmente mediante la combinazione con altre metodologie, tra cui la metodologia semi-quantitativa LOPA – Layers Of Protection Analysis, che opera mediante l'associazione di coefficienti numerici alla probabilità di fallimento su domanda dei livelli di protezione indipendenti, ovvero alle barriere preventive e mitigative di un diagramma "Bow-Tie"). In questo ultimo modo il diagramma "Bow-Tie", opportunamente quantificato, può fornire sia una analisi preliminare dei pericoli e dei rischi sia una individuazione dei livelli di rischio associati a differenti configurazioni ("risk ranking") rispetto a criteri di accettabilità predefiniti. La metodologia "Bow-Tie" pertanto consente alle

organizzazioni di sviluppare strategie complete di gestione del rischio e a migliorare la comprensione dei pericoli e dei loro potenziali impatti, indipendentemente dal dominio applicativo.

2.1 L'applicazione del metodo "Bow-Tie" alla valutazione del rischio di incendio ed esplosione dei BESS

Al fine di condurre una attività di individuazione dei rischi e dei principali elementi critici ai fini della sicurezza di una tipica installazione costituita da una serie di BESS si è proceduto all'applicazione della tecnica "Bow-Tie" ed alla definizione di diagrammi "tipici". Tale approccio risulta coerente con quanto già sviluppato, sempre per i sistemi BESS, e disponibile nella letteratura scientifica di riferimento che mostra alcune applicazioni del metodo Bow-Tie alla sicurezza antincendio dei sistemi di accumulo dell'energia tramite batterie, in applicazioni industriali.

I Bow-Tie "tipo" identificati e sviluppati sono i seguenti:

- BT-001 - Battery Energy Storage System (BESS) agli ioni di Litio - Fase operativa
- BT-002 - Battery Energy Storage System (BESS) agli ioni di Litio - Fase di "precommissioning e test".

Tale distinzione si rende necessaria al fine di tenere conto della diversa configurazione delle installazioni nelle fasi di "operation" e "precommissioning", con particolare riferimento all'assenza del dry pipe (Sistema di protezione attiva antincendio per il diluvio ad azione manuale sul singolo BESS sorgente di incidente) nella fase di "precommissioning", ipotizzata come unica differenza tra le due configurazioni.

Osservando la Figura 1, possiamo notare che sul lato sinistro le barriere sono interposte tra gli eventi iniziali e l'evento superiore, mentre sul lato destro sono interposte tra l'evento superiore e gli scenari.

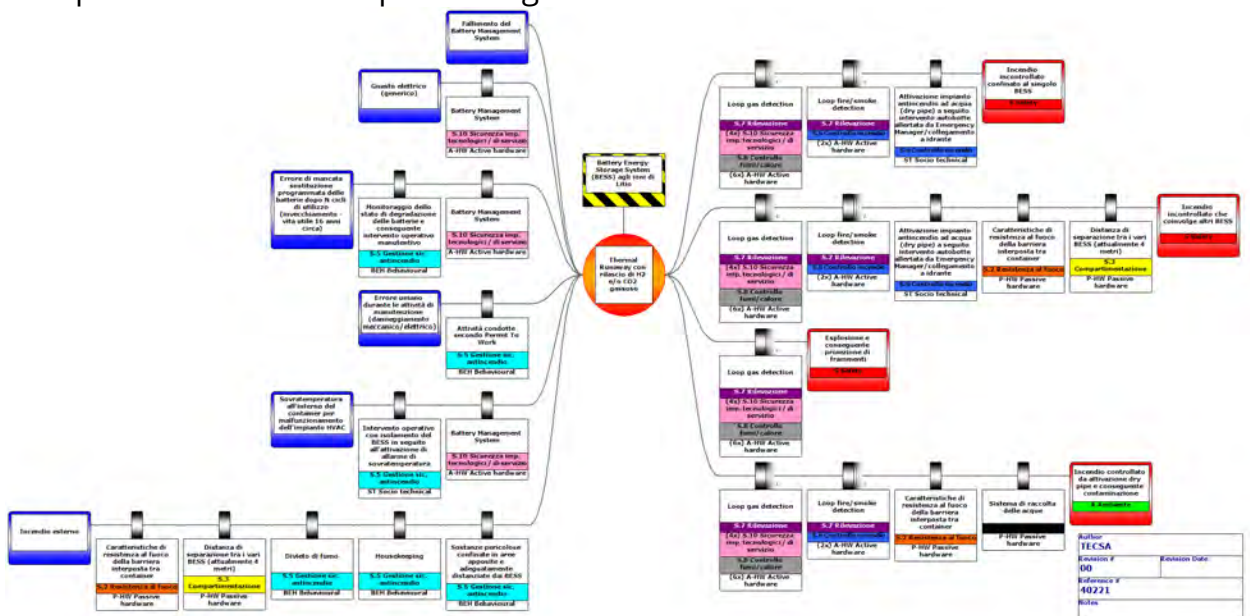


Figura 1. Tipico diagramma "Bow-Tie" per i BESS in fase di operation

La seguente tabella elenca i pericoli ed i top event analizzati associati ai pericoli.

| ID Bow-Tie | Pericolo | Top Event |
|------------|--|--|
| BT-001 | Battery Energy Storage System (BESS) agli ioni di Litio - Operations | Thermal Runaway con rilascio di H2 e/o CO2 gassoso |
| BT-002 | Battery Energy Storage System (BESS) agli ioni di Litio - Precommissioning | Thermal Runaway con rilascio di H2 e/o CO2 gassoso |

Tabella 1. Pericoli e top event nei diagrammi "Bow-Tie"

Per il BT-001 sono state analizzate le seguenti conseguenze afferenti gli aspetti di sicurezza ed eventuali impatti su matrici ambientali:

1. Incendio incontrollato confinato al singolo BESS - Sicurezza
2. Incendio incontrollato che coinvolge altri BESS - Sicurezza
3. Esplosione e conseguente proiezione di frammenti - Sicurezza
4. Incendio controllato da attivazione dry pipe e conseguente contaminazione - Ambiente

In particolare, lo scenario ambientale di cui alla voce n. 4 si riferisce all'ipotesi di un container BESS che, benché su fondazione cementizia, è circondato da terreno permeabile. L'impatto ambientale ipotizzato si riferisce alla contaminazione delle matrici "suolo" e "falda" da acqua di spegnimento contaminata con prodotti di combustione delle celle e comunque del container in fiamme. La determinazione qualitativa e quantitativa dell'entità della contaminazione (sia in termini di specie chimiche generate a seguito dell'evento che in termini di concentrazione di contaminanti dispersi nelle matrici ambientali) non è oggetto delle analisi e degli approfondimenti argomentati nel presente documento, che si concentra sugli aspetti critici per la sicurezza.

In accordo agli obiettivi di sicurezza stabiliti dal DM 18/10/2019 (cd. "Edizione aggiornata del Codice di Prevenzione Incendi di cui al DM 3/8/2015"), la gestione dei requisiti inerenti le strategie antincendio implementate presso le installazioni BESS richiederà l'istituzione di uno specifico Sistema di Gestione della Sicurezza Antincendio (SGSA) in esercizio ed in emergenza, la cui attuazione sarà responsabilità del gestore della installazione. Vale la pena evidenziare che, indipendentemente dall'assoggettabilità specifica dei BESS alla normativa di prevenzione incendi di cui si è detto in un precedente capitolo, la correlazione delle barriere di protezione del diagramma "Bow-Tie" alle strategie antincendio previste nel codice di prevenzione incendi consente di delineare l'equilibrio delle misure di riduzione del rischio per ciascuno scenario incidentale descritto secondo le coppie "cause-conseguenze" con un approccio olistico, cos' come auspicabile per tutti i sistemi socio-tecnici caratterizzati da un certo livello di complessità.

In tabella 2 è anche data evidenza della correlazione tra barriere e la corrispondente strategia antincendio così come definita dal codice di prevenzione incendi.

| ID Barriera | Barriera | Strategia antincendio |
|------------------------|---|----------------------------------|
| 1 | Battery Management System | S-10 |
| 2 | Battery Management System (il BMS disalimenta le batterie interessate per aumento della temperatura sopra la soglia dovuto al malfunzionamento del chiller) | S-10 |
| 3 | Attività condotte secondo Permit To Work | S-5 |
| 4 | Intervento operativo con isolamento del BESS in seguito all'attivazione di allarme di sovratemperatura | S-5 |
| 5 | Caratteristiche di resistenza al fuoco della barriera interposta tra container | S-2 |
| 6 | Distanza minima di separazione tra i vari BESS (attualmente 4 metri) | S-3 |
| 7 | Divieto di fumo | S-5 |
| 8 | Housekeeping | S-5 |
| 9 | Sostanze pericolose confinate in aree apposite e adeguatamente distanziate dai BESS | S-4 |
| 10 | Gas detection alarm activation | S-7 |
| 11 | High cell temperature trip (cell level) | S-10 |
| 12 | Thermal runaway trip (cell level) | S-10 |
| 13 | Rack switch fail-to-trip (rack level) | S-10 |
| 14 | Inverter/charger fail-to-trip (supervisor level) | S-10 |
| 15 | Extraction fan activation | S-8 |
| 16 | Fire detection alarm activation | S-7 |
| 17/A | Attivazione automatica impianto antincendio ad aerosol a seguito di rivelazione incendio e contestuale stop del sistema HVAC e extraction fan | S-6 |
| 17/B | Attivazione automatica impianto antincendio ad aerosol a seguito di rivelazione incendio | S-6 |
| 18 | Attivazione impianto antincendio ad acqua (dry pipe) a seguito intervento autobotte allertata da Emergency Manager/collegamento a idrante | S-6 |
| 19 | Sistema di raccolta delle acque | n.a. |
| 20 | Fusibile | S-10 |
| 21 | Utilizzo di celle testate secondo UL 9540A riduce la propagazione del thermal runaway | S-10 |
| 22 | Cavi non propaganti fiamma ed autoestinguenti | S-10 |
| 23 | Distanza di sicurezza interna in accordo al DM 15/07/2014 | S-3 |
| 24 | Protezioni elettriche che in centesimi di secondo isolano l'apparecchiatura | S-10 |

Tabella 2. Barriere (layers di protezione) nei diagrammi Bow-Tie

Prendendo come esempio lo Scenario n.1, "Incendio incontrollato confinato in un singolo contenitore BESS", viene mitigato da quattro barriere:

- Utilizzo di celle certificate UL9540A che riducono la propagazione del runaway termico (Strategia S.10 del Codice di Prevenzione Incendi relativa ai vari dispositivi di attivazione per la sicurezza del processo);
- Circuito di rilevamento dei gas che attiva l'isolamento o lo spegnimento della batteria o dei sistemi elettrici (che coinvolge le Strategie S.7 (Strategia S.7 relativa ai sistemi di rivelazione, S.8 relativa al sistema di controllo dei fumi e S.10);
- Circuito di rivelazione di incendio/fumo che attiva i sistemi automatici di soppressione degli incendi e fa scattare l'intervento di emergenza (Strategie S.6 relativa ai sistemi di protezione antincendio attiva e S.7);
- Attivazione manuale del sistema di spegnimento ad acqua (dry pipe) a seguito dell'intervento di un'autobotte allertata dal Gestore dell'Emergenza / collegamento all'idrante (Strategia S.6).

È importante notare che l'analisi LOPA, effettuata per ciascuno scenario incidentale, è volta a definire il minimo grado di riduzione del rischio (RRF- risk reducing factor) associato a ciascuna barriera considerata congiuntamente con le ulteriori misure poste a mitigazione dello specifico scenario. Ciò equivale, per le funzioni strumentate di sicurezza, nell'ambito del soddisfacimento dei requisiti di cui agli standard in materia di sicurezza funzionale (IEC 61508 ed IEC 61511), alla definizione del loro "safety integrity level" (SIL).

3. Siti "Seveso" e gestione dei BESS

La recente esperienza operativa dei BESS a ioni di litio evidenzia una serie di incidenti particolarmente significativi anche in termini di effetti (tipicamente incendi ed esplosioni da run-away termico) che ripropongono con forza la necessità di analisi strutturate di questi rischi emergenti.

È quindi necessario, per gli operatori di questi impianti sempre più numerosi, valutare tutti i pericoli dati dalla presenza, reale o prevista (ivi incluse le condizioni di emergenza), di sostanze pericolose che è ragionevole prevedere possano essere generate, in caso di perdita di controllo dei processi (per incendio o per deriva termica).

Infatti, oltre agli effetti sopra citati, non è assolutamente possibile escludere nella fase di incidente vero e proprio anche lo sviluppo di dispersioni tossiche e infiammabili e nella fase di pianificazione e risposta all'emergenza la necessità di gestire le necessità di una protezione adeguata sia per gli operatori della squadra interna, sia del CNVVF, compresa la raccolta e smaltimento delle acque derivanti dalle azioni di spegnimento ai fini della tutela ambientale.

Quando una batteria agli ioni di litio si guasta e prende fuoco, l'elettrolita diventa il combustibile principale. In questa reazione di combustione, i sottoprodotti che si

generano sono tipicamente infiammabili. Inoltre, viene liberato il fluoro che proviene dal sale di litio che si scioglie nell'elettrolita. Quando l'idrogeno reagisce con il fluoro, si può formare acido fluoridrico (HF). La produzione di gas HF è direttamente proporzionale all'energia elettrica immagazzinata nella cella o nella batteria.

Sulla base di alcuni test sperimentali, risultati interessanti sono stati ottenuti e convalidati utilizzando due tecniche di misurazione indipendenti e mostrano che possono essere generate significative quantità di acido fluoridrico (HF), comprese tra 20 e 200 mg/Wh di capacità energetica nominale della batteria. Inoltre, in alcuni test di incendio sono stati misurati 15-22 mg/Wh di un altro gas potenzialmente tossico, il trifluoruro di fosforile (POF₃). Sono state analizzate anche le emissioni di gas quando si utilizza l'acqua nebulizzata come agente estinguente. L'emissione di gas fluoruro può rappresentare una seria minaccia tossica e i risultati sono fondamentali per la valutazione e la gestione del rischio, soprattutto per i grandi parchi di batterie agli ioni di litio.

Il BESS Failure Event Database fornisce un esempio in cui l'esposizione all'HF ha provocato diverse ospedalizzazioni dei primi soccorritori.

In tabella 3 sono riportati alcuni esempi, con l'esclusione della Corea del Sud (che ha registrato 29 eventi nel periodo 2018-2022)

| Location | Capacity (MWh-MW) | Application | installation | Event date | System age (y) | status |
|----------------------------------|-------------------|-------------------------|------------------------|------------|----------------|----------------------------|
| US, CA Moss Landing | 1,200-300 | Solar Integr. (SI) | Power Plant | 09-4-2021 | 0.8 | |
| Australia, Moorabool | 450-300 | Grid Stability (GS) | Rural | 07-30-2021 | 0 | Construction/commissioning |
| Germany Neuhardenberg | 5-5 | SI/ frequency reg. (FR) | Indoor/hangar | 07-18-2021 | 5 | |
| China, Beijing | 25- ? | SI+ other services | Mall | 04-16-2021 | | Construction/commissioning |
| France Perles-de-Castelet, Arège | 0.5-0.5 | Local demand mgt | substation | 12-1-2020 | 0 | testing |
| UK, Liverpool | 10-20 | FR | substation | 09-15-2020 | 1.5 | |
| US AZ, Surprise | 2-2 | Volt Reg, PQ, SI | | 04-19-2019 | 2 | |
| SK, N. Geyongsang, Chilgok | 3.7-? | SI | Mountains | 05-04-2019 | 2.2 | Charged, inactive |
| Australia, Brisbane | | SI | Indoor, elevated floor | 03-17-2020 | 6.7 | |
| Belgium, Drogenbos | 6(1;5)-4(1) | Test Center | Gas power plant | 11-11-2017 | 0 | |

Tabella 3. Esperienza storica di alcuni eventi incidentali sui BESS (fonte BESS Failure Event Database).

4. Conclusioni

Questo documento ha voluto fornire una panoramica dei rischi di incendio ed esplosione dei BESS, che possono essere affrontati con le tecniche proprie di gestione del rischio industriale e con i metodi della prevenzione incendi. Tali metodi possono risultare utili sia per individuare i pericoli, i rischi associati ai top-event e le

conseguenze attese rispetto le matrici vulnerabili di interesse (sicurezza, ambiente, business continuity) sia per recepire le risultanze dell'analisi della esperienza operativa a fronte degli incidenti che man mano si registrano per questa tecnologia industriale emergenza. In un periodo di maggiore sviluppo e diffusione delle installazioni BESS, infatti, come dimostra l'esperienza storica contenuta nel BESS Failure Event Database si può affermare che, sebbene questa tecnologia sia relativamente giovane, può già contare numerosi eventi incidentali. Inoltre, molti di questi incidenti hanno avuto conseguenze significative sotto forma di incendi, esplosioni e ricoveri ospedalieri a carico delle prime squadre di intervento.

È stata fornita una panoramica della tecnologia, abbinata a un'introduzione all'analisi dei rischi. L'analisi dei rischi, unita alla valutazione delle misure di mitigazione, è un requisito fondamentale nella fase di progettazione ed esercizio dei BESS. Sono state fornite indicazioni su come soddisfare questi requisiti, in accordo con la normativa italiana e su quali pericoli prestare attenzione. È emerso che il rischio più grave da prevenire o mitigare è il runaway termico con conseguenze di incendio o esplosione. Per quanto riguarda gli stabilimenti soggetti alla direttiva Seveso, senza entrare nel merito dell'eventuale assoggettabilità derivante dalla presenza di sostanze pericolose in una determinata quantità, anche in caso di eventi incidentali considerata anche la difficoltà di determinare in maniera esatta la quantificazione delle emissioni di acido fluoridrico e di altri gas tossici durante l'incendio, che comunque è bene non sottostimare, durante la fase di analisi dei rischi e di predisposizione dei Piani di Emergenza Interna le conseguenze di surriscaldamenti, che possono portare anche reazioni esotermiche incontrollate, con rilascio di fumi tossici e presenza di apprezzabili quantità di sostanze pericolose, tra cui anche l'acido fluoridrico, non limitandosi quindi ai primi, pur molto severi, effetti dell'eventuale esplosione risultante.

In assenza di informazioni affidabili, risulta pertanto fondamentale la predisposizione di apprestamenti prevenzione e mitigazione adeguati, come la dotazione di DPI per fronteggiare le situazioni di emergenza (per la squadra di intervento e di conseguenza per gli operatori del CNVVF) commisurati ai pericoli individuati, siano essi incendi, esplosioni o rilasci di sostanze tossiche.

Bibliografia

- [1] L. Fiorentini (2021) *Bow-Tie Industrial Risk Management Across Sectors: A Barrier-Based Approach*, Wiley, New York
- [2] L. Fiorentini, F. Dattilo (2023) *Fire Risk Management: Principles and Strategies for Buildings and Industrial Assets*, Wiley, New York
- [3] L. Fiorentini, L. Marmo (2018) 'Sound Barriers Management in Process Safety: Bow-tie Approach According to the First Official AIChE-CCPS Guidelines', *CET Chemical Engineering Transactions*, AIDIC, Milano

- [3] L. Fiorentini, F. Dattilo (2023) The application of the Italian Fire Code (IFC) to Battery Energy Storage Systems (BESS). SFPE Europe Magazine,
- [4] J. Conzen, S. Lakshmipathy, A. Kapahi, S. Kraft, M. DiDomizio (2023) '*Lithium-ion battery energy storage systems (BESS) hazards*', Journal of Loss Prevention in the Process Industries n. 81/2023, Elsevier, Amsterdam
- [5] BESS Failure Event Database,
https://storagewiki.epri.com/index.php/BESS_Failure_Event_Database
- [6] F. Larsson, P. Andersson, P. Blomqvist, B. E. Mellander (2017) Toxic fluoride gas emissions from lithium-ion battery fires. Scientific Reports
- [7] Lombardo, G., Foreman, M.R.S.J., Ebin, B. et al. (2023) '*Determination of Hydrofluoric Acid Formation During Fire Accidents of Lithium-Ion Batteries with a Direct Cooling System Based on the Refrigeration Liquids*', Fire Technology 59, 2375–2388
- [8] Fredrik Larsson, Petra Andersson, Per Blomqvist et al. (2017) '*Toxic fluoride gas emissions from lithium-ion battery fires*', Scientific Reports, Nature.com

Stima della probabilità di guasto su richiesta (PFD) con le relazioni semplificate dell'IEC 61508

D. Sallustio, F. P. Nigri

Inail – Uot di Bari

Abstract

La valutazione del rischio è uno degli aspetti più importanti della gestione della sicurezza in ambito industriale. Tale valutazione non è sempre di facile applicazione a causa della necessità di utilizzo di metodologie alquanto complesse.

In passato, si è spesso pensato che il malfunzionamento dei sistemi di sicurezza fosse causato soprattutto da errori umani piuttosto che da errori di progettazione o penuria di manutenzione dei componenti di sicurezza.

Oggi, si ritiene che non sia più sufficiente adottare procedure standardizzate atte a ridurre gli errori umani, ma che sia anche necessario utilizzare componentistica “idonea” allo scopo.

L'IEC 61508 offre un diverso punto di vista: per conseguire un livello di sicurezza accettabile, non solo occorre corredare i sistemi di sicurezza di componenti “idonei”, ma occorre anche dotare tali sistemi di componenti “affidabili”, e cioè in grado di garantire l'effettuazione della funzione di sicurezza quando ciò è richiesto dal processo.

Poiché la valutazione del livello di affidabilità di un sistema di sicurezza non può prescindere dalla stima della sua probabilità di guasto su richiesta (PFD), il calcolo della PFD rappresenta lo scopo principale dell'IEC 61508.

In quest'ambito si inserisce il lavoro proposto, che intende illustrare come si possa stimare la PFD facendo uso delle relazioni semplificate che derivano dall'applicazione delle c.d. “Markov chains”.

Keywords: reliability, probability of failure on demand, functional safety, safety instrumented systems

1. Introduzione

Per rendere accessibile il contenuto del lavoro proposto, si è ritenuto opportuno procedere per step successivi, a ciascuno dei quali corrisponde un paragrafo.

Il primo paragrafo introduce il concetto di “Mean Down Time (MDT)”, tempo medio di permanenza in avaria di un sistema di sicurezza. Questo paragrafo fa riferimento al “white paper” di Mirek Generowicz, citato in bibliografia^[2].

Il paragrafo successivo è interamente dedicato al calcolo del valore medio della probabilità di guasto su richiesta, (PFD_{AVG}). Lo sviluppo di questo paragrafo ripercorre

in modo rigoroso il contenuto dell'articolo proposto nel 2007 da J. Börcsök e P. Holub^[3].

Poiché, però, l'obiettivo principale del lavoro è quello di dimostrare come si possa risalire alla PFD_{AVG} facendo leva sulle relazioni semplificate proposte dall'IEC 61508, il terzo paragrafo ripercorre parte del libro di William M. Goble e Harry Cheddie, anch'esso citato in bibliografia^[4]. Questo libro è particolarmente interessante se si pensa che William Goble è uno degli estensori dell'IEC 61508^[1], standard internazionale alla base della sicurezza funzionale.

2. Mean Down Time

Il calcolo della PFD si basa sul concetto di "Mean Down Time (MDT)", tempo medio di permanenza in avaria del sistema di sicurezza.

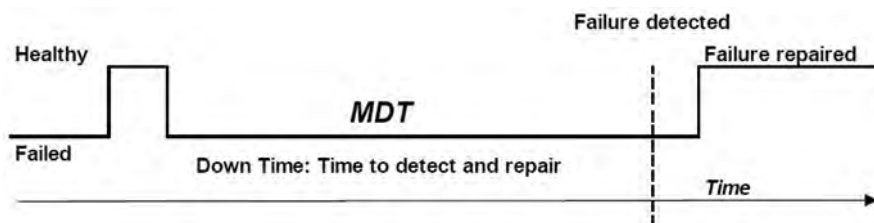


Figura 1. Mean Down Time (MDT)

Il "Mean Down Time" può essere riguardato come l'aliquota del "tempo totale di missione" durante la quale il SIS, a causa di un guasto, non è in grado di portare a compimento la funzione di sicurezza alla quale è deputato.

Il "Mean Down Time" raccoglie due contributi distinti:

- il primo corrisponde al tempo necessario per rilevare il guasto (time to detect);
- il secondo equivale al tempo richiesto per riparare il guasto (time to repair), che la norma assume uguale a un intero turno lavorativo di otto ore.

Il tempo medio di rilevamento del guasto è, in genere, più lungo del tempo medio di riparazione del guasto dal momento che i "guasti di tipo DU" possono rimanere latenti per mesi, fino all'effettuazione di un test funzionale in grado di portarli alla luce con prove sul campo.

In quest'ottica, il "Mean Down Time" dipende soprattutto dall'intervallo di tempo che intercorre tra due test funzionali consecutivi, che la norma denota con $T1$. Quanto più aumenta $T1$, tanto più aumenta la PFD nel tempo. L'incremento nel tempo della PFD può essere efficacemente rappresentato dalla curva di figura 2.

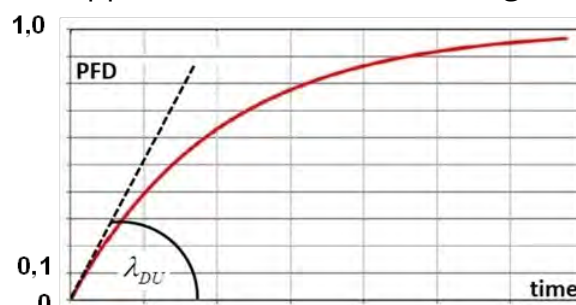


Figura 2. Andamento della PFD nel tempo

Come si vede, la PFD ha inizialmente valore nullo e tende asintoticamente al valore unitario.

Questo risultato dimostra inequivocabilmente la sua natura di “probabilità” che, per definizione, è un numero puro compreso fra zero e uno, laddove:

- il valore nullo esprime la probabilità di accadimento di un evento impossibile;
- il valore unitario esprime la probabilità di accadimento di un evento certo.

3. Calcolo della PFD_{AVG}

L’incremento nel tempo della PFD segue una legge esponenziale negativa. Non ha senso per l’IEC 61508 considerare valori della PFD superiori a 0,1 perché tale valore corrisponde al valore massimo della PFD.

Nell’intervallo $[0; 0,1]$ l’andamento della PFD è lineare con buona approssimazione. Il coefficiente angolare della retta si identifica con il tasso dei guasti di tipo DU, che si denota con il simbolo λ_{DU} .

Pertanto, in tale intervallo, si può considerare valida la seguente espressione della PFD(t):

$$PFD(t) = \lambda_{DU} \cdot t \quad (1)$$

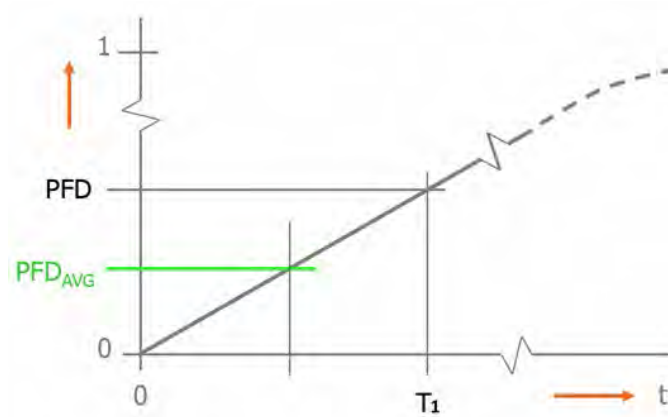
La relazione funzionale (1) prova che, in considerazione della loro natura subdola, i guasti pericolosi non rilevabili, che si verificano continuamente nel tempo con rateo costante λ_{DU} , sono gli unici guasti del sistema di sicurezza in grado di influenzare negativamente la PFD del sistema.

A questo punto, una domanda è d’obbligo: quale tipo di guasto può essere considerato di tipo DU? Cortocircuiti e disconnessioni sono di certo guasti pericolosi. Essi, però, non rientrano nel novero dei “guasti di tipo DU” poiché sono facilmente rilevabili dalla diagnostica interna di cui componenti di sicurezza sono corredati.

Un sensore che non rileva un aumento indesiderato di pressione è presumibilmente affetto da un “guasto di tipo DU”: esso apparentemente funziona ma non è in grado di riportare al trasduttore, ad esso abbinato, il picco di pressione che effettivamente si registra nel processo in quel dato istante.

Per semplificare il calcolo della PFD, l’IEC 61508 fa riferimento alla PFD_{AVG} , valore medio che la probabilità istantanea di guasto PFD(t) assume nell’intervallo di tempo di figura 3, i cui estremi corrispondono rispettivamente:

- al tempo iniziale di osservazione ($t = 0$);
- all’istante di tempo in cui ha inizio il primo test funzionale ($t = T1$).

Figura 3. PFD_{AVG}

$$PFD_{AVG} = \frac{1}{T1} \cdot \int_0^{T1} \lambda_{DU}(t) \cdot dt \quad (2)$$

Considerata la costanza nel tempo di λ_{DU} , si ottiene:

$$PFD_{AVG} = \frac{1}{T1} \cdot \int_0^{T1} \lambda_{DU} \cdot t \cdot dt \quad (3)$$

$$PFD_{AVG} = \frac{1}{T1} \cdot \lambda_{DU} \int_0^{T1} t \cdot dt \quad (4)$$

$$PFD_{AVG} = \frac{1}{T1} \cdot \lambda_{DU} \cdot \left[\frac{t^2}{2} \right]_0^{T1} \quad (5)$$

$$PFD_{AVG} = \frac{1}{T1} \cdot \lambda_{DU} \cdot \left(\frac{T1^2}{2} - 0 \right) \quad (6)$$

$$PFD_{AVG} = \frac{1}{T1} \cdot \frac{\lambda_{DU} \cdot T1^2}{2} \quad (7)$$

$$PFD_{AVG} = \frac{1}{2} \cdot \lambda_{DU} \cdot T1 \quad (8)$$

La relazione funzionale (8) prova che, mediamente, i “guasti di tipo DU” rimangono latenti per un periodo di tempo la cui ampiezza è pari alla metà dell'intervallo di tempo $T1$, che intercorre fra due test funzionali consecutivi.

Il risultato conseguito risulta più chiaro se si analizza attentamente quanto riportato in figura 4. Individuato il “guasto di tipo DU” nel corso del test funzionale, esso viene riparato entro il tempo medio di riparazione (Mean Time To Repair, MTTR).

Il Mean Time To Repair è misurato in ore ed è, quindi, molto più breve di $T1$, che è generalmente espresso in mesi. Tuttavia, il tempo medio di riparazione non può essere trascurato se l'obiettivo è la stima accurata del Mean Down Time.

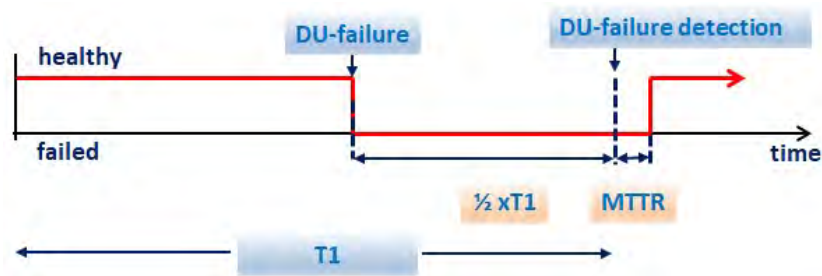


Figura 4. Mean Time To Repair (MTTR)

I “guasti di tipo DU” si verificano nel tempo con tasso di guasto $\lambda_{DU} = \text{costante}$. Via via che i “guasti di tipo DU” si accumulano, aumenta nel tempo la PFD_{AVG} .

Al termine di un test funzionale, la PFD_{AVG} è di nuovo uguale a zero per cui il SIS può essere considerato come nuovo.

Per la piena comprensione di questa affermazione si rimanda alla figura 5, che riporta l’andamento nel tempo della PFD_{AVG} , rappresentato da un grafico a “denti di sega”.

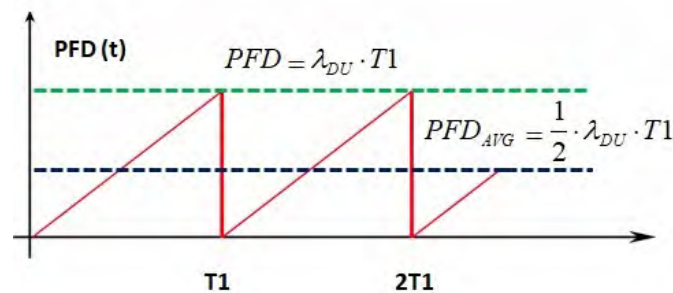


Figura 5. Andamento nel tempo della PFD_{AVG}

4. Calcolo della PFD_{AVG} di un sistema con architettura del tipo 1oo1

Un sistema di sicurezza caratterizzato da architettura del tipo 1oo1 (1 out of 1) ha un solo canale di trasmissione del segnale che collega:

- sensore/trasduttore;
- solutore logico;
- elemento finale (valvola azionata e relativo attuatore).

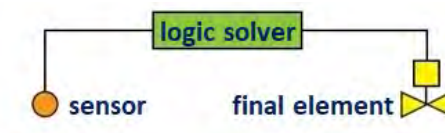


Figura 6. Sistema di sicurezza monocanale (architettura del tipo 1oo1)

Secondo l’IEC 61508, la PFD_{AVG} di un sistema monocanale è data dalla seguente relazione funzionale:

$$PFD_{AVG} = (\lambda_{DU} + \lambda_{DD}) \cdot t_{DE} \quad (9)$$

Nella relazione (9), i simboli hanno il seguente significato:

- λ_{DD} è il tasso dei “guasti di tipo DD”, e cioè “Dangerous Detected”, come cortocircuiti e disconnessioni, facilmente rilevabili attraverso i moderni strumenti di diagnostica interna dei componenti di sicurezza;
- t_{DE} è il “tempo di avaria medio equivalente” del sistema di sicurezza nel suo complesso.

L’IEC 61508 propone la seguente relazione funzionale per il calcolo di t_{DE} :

$$t_{DE} = \frac{\lambda_{DD}}{\lambda_D} \times MTTR + \frac{\lambda_{DU}}{\lambda_D} \times \left(\frac{T1}{2} + MTTR \right) \quad (10)$$

Stante la (10), il tempo di avaria medio equivalente MDT del sistema di sicurezza, caratterizzato da un solo canale di trasmissione del segnale, può essere suddiviso in due componenti, che rappresentano rispettivamente:

- il tempo medio di permanenza in avaria MDT1, correlato ai “guasti di tipo DD”, che sono oggetto di immediata rilevazione da parte degli strumenti di diagnostica interna;
- il tempo medio di permanenza in avaria MDT2, associato ai “guasti di tipo DU”.

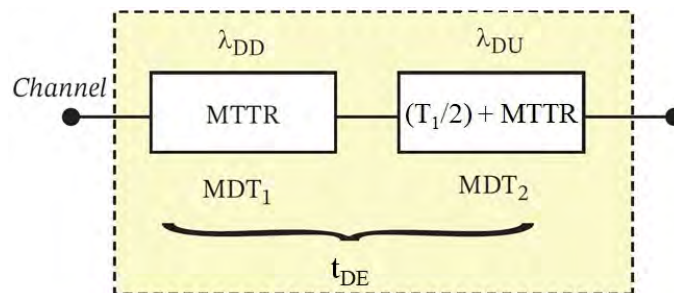


Figura 7. Tempo di avaria medio equivalente (t_{DE}) del sistema monocanale (1oo1)

A questo punto, è opportuno richiamare l’attenzione del lettore sul fatto che la Copertura Diagnostica (DC) è un numero puro, definito dal rapporto tra il tasso dei “guasti di tipo DD” e il tasso totale totale dei guasti pericolosi, che evidentemente comprendono sia i “guasti di tipo DD” che i “guasti di DU”:

$$DC = \frac{\lambda_{DD}}{\lambda_D} \quad (11)$$

Dal momento che risulta:

$$\lambda_D = \lambda_{DD} + \lambda_{DU} \quad (12)$$

la relazione funzionale (9) può essere riproposta nei termini seguenti:

$$PFD_{AVG} = \lambda_D \cdot t_{DE} \quad (13)$$

5. Markov chains

Le catene di Markov sono modelli logici utilizzati per descrivere il comportamento di sistemi il cui stato cambia in modo casuale nel tempo. Le probabilità, che ha un sistema di passare in modo random da uno stato all’altro, sono chiamate probabilità

di transizione. La somma di tutte le probabilità di transizione, che afferiscono a un certo stato del sistema, è sempre uguale all'unità.

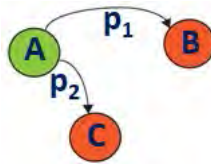


Figura 8. Markov chains

In figura 8:

- p_1 rappresenta la probabilità che ha il sistema di passare dallo stato iniziale A allo stato finale B;
- p_2 rappresenta la probabilità che ha il sistema di passare dallo stato iniziale A allo stato finale C, distinto dallo stato finale B.

Per quanto abbiamo appena affermato:

$$p_1 + p_2 = 1 \quad (14)$$

Facciamo un esempio con riferimento alle previsioni meteo che, per antonomasia, si prestano ad analisi che poggiano su basi probabilistiche.

Se ieri c'era sole, c'è una probabilità del 60% che oggi ci sia di nuovo sole e una probabilità residua del 40%, complementare alla prima, che oggi piova. Allo stesso modo, se ieri è piovuto, c'è una probabilità del 70% che oggi piova di nuovo e una probabilità residua del 30% che oggi ci sia sole.

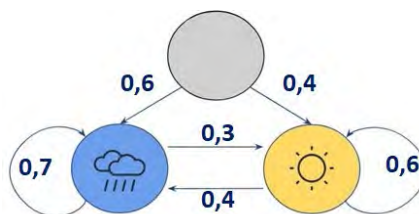


Figura 9. Applicazione delle catene di Markov alle previsioni meteo

Trasferiamo queste considerazioni al caso di un sistema di sicurezza. Lo stato del sistema cambia improvvisamente da "zero (healthy)" a "uno (failed)" a causa di un guasto pericoloso. L'istante in cui ciò accade non può essere stimato poiché il guasto pericoloso è di tipo casuale e, in quanto tale, può verificarsi in qualsiasi istante nell'intervallo che corrisponde al tempo di missione del sistema.

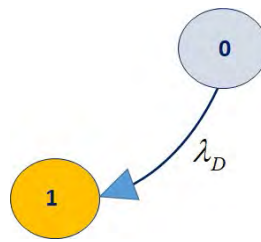


Figura 10. Effetto di un “guasto di tipo D” sullo “stato iniziale (zero)” del sistema

Se teniamo conto della relazione funzionale (12), di seguito richiamata per comodità,

$$\lambda_D = \lambda_{DD} + \lambda_{DU} \quad (12)$$

la figura 9 può essere rivista come segue:

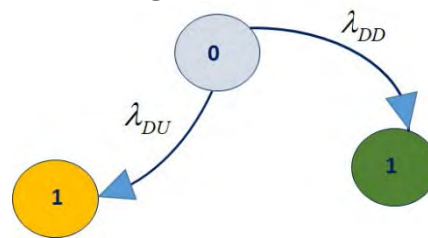


Figura 11

Teniamo conto del fatto che:

$$\lambda_{DD} = \lambda_D \cdot DC \quad (15)$$

$$\lambda_{DU} = \lambda_D \cdot (1 - DC) \quad (16)$$

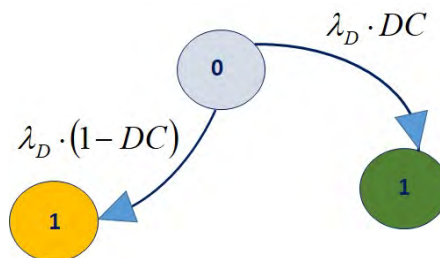


Figura 12

Appare evidente che, in figura 12, possiamo affrancare dal tasso di guasto λ_D le probabilità di transizione che afferiscono allo stato iniziale 1 del sistema.

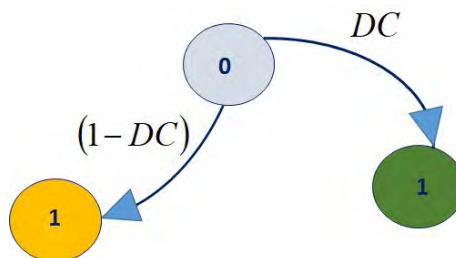


Figura 13

La figura 13 rappresenta un'autentica "catena di Markov". Infatti, la somma di tutte le probabilità di transizione, che afferiscono allo stato iniziale 1 del sistema di sicurezza, è uguale all'unità:

$$DC + (1 - DC) = 1 \quad (17)$$

Ricordiamo la definizione di Copertura Diagnostica (DC):

$$DC = \frac{\lambda_{DD}}{\lambda_D} \quad (11)$$

La relazione (11), tenendo conto della (12), porta a scrivere:

$$DC = \frac{\lambda_{DD}}{\lambda_D} = \frac{\lambda_D - \lambda_{DU}}{\lambda_D}$$

$$DC = 1 - \frac{\lambda_{DU}}{\lambda_D}$$

Per cui:

$$1 - DC = \frac{\lambda_{DU}}{\lambda_D} \quad (18)$$

Le relazioni (11) e (18) consentono di riproporre la figura 13 come segue:

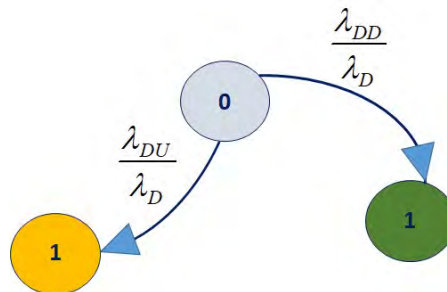


Figura 14

La figura 14 si presta alle seguenti considerazioni.

Un "guasto di tipo DD" porta il sistema da zero (healthy) a uno (failed) con una probabilità uguale a $\frac{\lambda_{DD}}{\lambda_D}$.

In tal caso, il tempo medio di permanenza in avaria MDT1 equivale al tempo medio di riparazione *MTTR*, in quanto il guasto di tipo DD è suscettibile di immediata rilevazione da parte degli strumenti di diagnostica interna del sistema.

Un "guasto di tipo DU" porta il sistema da zero (healthy) a uno (failed) con una probabilità uguale a $\frac{\lambda_{DU}}{\lambda_D}$.

In tal caso, il tempo medio di permanenza in avaria MDT2 è somma della metà dell'intervallo di tempo che intercorre fra due test funzionali consecutivi e del tempo medio di riparazione, $\frac{1}{2} \times T1 + MTTR$, in quanto il guasto di tipo DU non è suscettibile di rilevazione da parte degli strumenti di diagnostica interna del sistema.

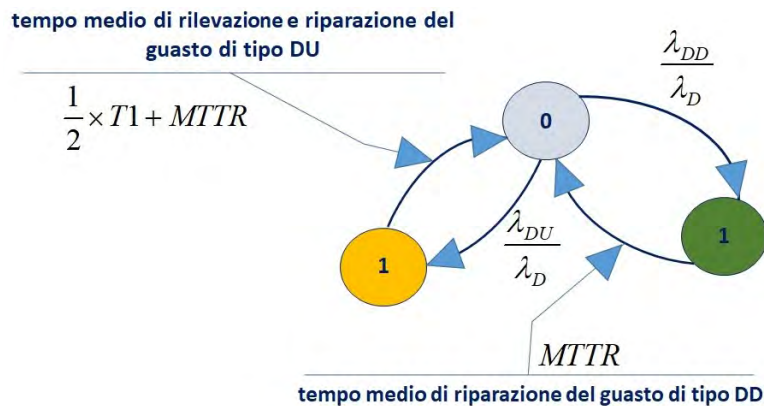


Figura 15

Non resta che stabilire le modalità con le quali tener conto dei due contributi, MDT1 ed MDT2, del tempo medio di permanenza in avaria del sistema di sicurezza.

6. Porta OR

La Porta OR è un operatore booleano che:

- accetta due ingressi, e cioè due valori di input;
- restituisce un solo valore in uscita.

Gli ingressi e le uscite sono numeri binari (bit) che assumono, pertanto, solo due stati logici:

- 0: healthy;
- 1: failed.

La Porta OR restituisce il valore unitario (failed) se uno o entrambi gli input hanno valore uno. Solo nel caso in cui entrambi gli input siano nulli (healthy), la Porta OR restituisce in uscita il valore zero. Il comportamento della Porta OR, appena descritto, è evidenziato molto efficacemente dalla "tabella di verità" ad essa abbinata.

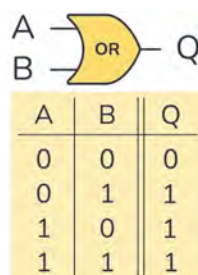


Figura 16. Tabella di verità associata alla Porta OR

Dalla tabella di verità associata alla Porta OR deduciamo facilmente che:

$$A + B = Q \quad (19)$$

L'applicazione della Porta OR al sistema in esame porta a sviluppare il seguente albero dei guasti:

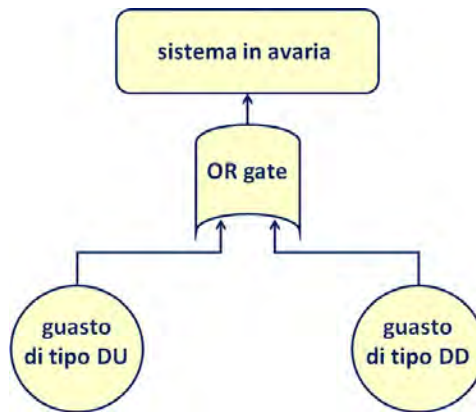


Figura 17. Applicazione della Porta OR al sistema in esame

7. Conclusioni

Il sistema può essere affetto da un “guasto di tipo DD” oppure, in alternativa, da un “guasto di tipo DU”. In entrambi i casi, il sistema si ritrova in avaria. Questa semplice considerazione è sufficiente a giustificare l'applicazione della Porta OR al sistema in esame.

- Nel primo caso, che si verifica con una probabilità uguale a $\frac{\lambda_{DD}}{\lambda_D}$, il tempo medio di permanenza in avaria MDT1 corrisponde al tempo medio di riparazione: *MTTR*.
- Nel secondo caso, la cui probabilità di accadimento è $\frac{\lambda_{DU}}{\lambda_D}$, il tempo medio di permanenza in avaria MDT2 equivale alla somma della metà dell'intervallo di tempo che intercorre fra due test funzionali consecutivi $\frac{1}{2} \times T1$ e del tempo medio di riparazione *MTTR*: $\frac{1}{2} \times T1 + MTTR$.

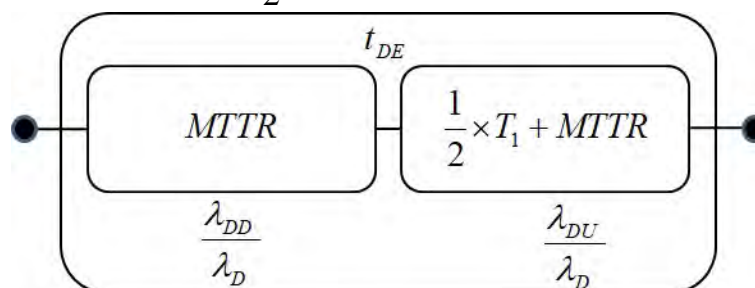


Figura 18. Block diagram (IEC 61508-6)

Stante la validità della relazione (19), che discende direttamente dalla tabella di verità della Porta OR, possiamo sommare i due contributi tenendo conto delle relative probabilità di accadimento:

$$\frac{\lambda_{DD}}{\lambda_D} \times MTTR + \frac{\lambda_{DU}}{\lambda_D} \times \left(\frac{T1}{2} + MTTR \right) \quad (20)$$

L'espressione (20) è del tutto identica al secondo membro della relazione (10) che l'IEC 61508 propone per la valutazione del tempo medio di permanenza in avaria t_{DE} di un sistema di sicurezza monocanale.

In definitiva, nella stima della PFD_{AVG} di un sistema di sicurezza, per la quale l'IEC 61508 propone la relazione funzionale (13), la norma rivela tutta la sua natura probabilistica. L'approccio probabilistico dell'IEC 61508 consente di stimare l'Inaffidabilità di un sistema di sicurezza, intesa come probabilità di fallimento del sistema, e cioè come probabilità di non portare a compimento la funzione di sicurezza che al sistema viene affidata.

Bibliografia

- [1] International Standard IEC 61508: "Functional safety of electrical, electronic, programmable electronic safety related systems". Part 6. - Geneva: International Electrotechnical Commission.
- [2] Generowicz M. (2014): "An explanation of the principles behind failure rate equations" - I&E Systems Pty Limited, Perth, Western Australia.
- [3] Börcsök J. & P. Holub (2007) - HIMA Paul Hildebrandt GmbH, Germany - Computer architecture & System programming, University of Kassel, Germany: "Calculation of PFD values for a safety related system" - Risk, Reliability and Societal Safety – Aven & Vinnem - Copyright © 2007 Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-0-415-44786-7.
- [4] Goble W. M. & Cheddie H. (2010). Safety Instrumented System verification: practical probabilistic calculations, Exida, Sellerville. Copyright © 2005 ISA - The Instrumentation, Systems and Automation Society - ISBN 1-55617-909-X.

UNI/TS 11325-13 - Sistema di monitoraggio dei dati di esercizio di attrezzature a pressione

F. Giacobbe¹, C. Mennuti², E. Pichini², G. Rondinella³, G. Pinna⁴, F. Castorina⁵, S. Geppetti⁶, R. Calcagni⁷

¹ Inail - Uot di Messina

² Inail - Dit

³ Senior Expert Engineer

⁴ Comitato Termotecnico Italiano Energia e Ambiente

⁵ Assogasliquidi

⁶ IMQ

⁷ GISI

Abstract

Nell'attuale contesto produttivo industriale, sempre più avanzato e interconnesso, il rilevamento dei parametri di esercizio, mediante trasduttori installati sulle attrezzature a pressione è di fondamentale e strategica importanza per l'esercizio in sicurezza delle attrezzature a pressione. Entro la fine del 2023 si dovrebbero concludere i lavori condotti dal Comitato Termotecnico Italiano relativamente alla specifica tecnica UNI/TS 11325-13 "Attrezzature a pressione - Messa in servizio ed utilizzazione delle attrezzature e degli insiemi a pressione - Parte 13: Guida alla realizzazione di un sistema di monitoraggio dei dati di esercizio di attrezzature a pressione". La specifica si rivolge prevalentemente agli utilizzatori, ma rappresenta anche un concreto e utile documento di riferimento per progettisti, tecnici, manutentori, enti e organismi di controllo. L'obiettivo è di fornire indicazioni e raccomandazioni sull'implementazione di un sistema di monitoraggio in forma non sostitutiva o prescrittiva rispetto alle disposizioni legislative vigenti. Nel documento sono presenti i suggerimenti per la scelta dei trasduttori in funzione delle loro caratteristiche tecniche e dei parametri di esercizio da monitorare, in continuo o ad intervalli discreti. La logica PDCA (plan-do-check-act), tipica dei sistemi di gestione, è utilizzata per progettare il sistema di monitoraggio. Tenuto conto dei continui progressi della tecnologia la specifica non intende puntualizzare le performance dei trasduttori bensì la metodica di lavoro da adottare per la scelta dei dispositivi, dei criteri per la gestione e l'archiviazione dei dati. L'analisi dei dati può fornire all'utilizzatore importanti elementi per individuare precocemente eventuali derive indirizzando le attività di gestione delle attrezzature monitorate verso approcci basati sulla prognostica avanzata e la manutenzione predittiva.

Keywords: monitoraggio, sensore, trasduttore, attrezzature a pressione, pdca.

1. Introduzione

Tra i lavori condotti dal Comitato Termotecnico Italiano, è attualmente nella fase di draft la specifica tecnica "monitoraggio dei parametri di esercizio di attrezzature a pressione". Tale progetto normativo è inserito nell'ambito dei vari lavori condotti dal comitato UNI/CT 223 "esercizio e dispositivi di protezione delle installazioni a pressione" ed è sviluppato e strutturato dal gruppo di lavoro GL 4 "monitoraggio delle installazioni a pressione". In tale contesto documentale, per monitoraggio delle attrezzature a pressione intendiamo la identificazione e successiva rilevazione, attraverso misure strumentali eseguite in continuo o a intervalli prefissati, dei fenomeni fisici che caratterizzano l'esercizio di attrezzature a pressione al fine di determinarne l'evoluzione nel tempo. La specifica tecnica si rivolge in prevalenza agli utilizzatori di impianti ed insiemi a pressione, ma rappresenta anche un concreto strumento operativo di riferimento per progettisti, tecnici, manutentori ed enti / organismi preposti alle attività di controllo e/o verifica. Il documento fornisce una serie di indicazioni e raccomandazioni sull'impiego e gestione del processo di monitoraggio in forma non sostitutiva o complementare alle eventuali prescrizioni per i controlli e le verifiche previsti dalle disposizioni legislative o da standard di riferimento.

La specifica tecnica ha la finalità di linea guida per la gestione del processo di monitoraggio, propone dunque, suggerimenti e indicazioni di massima per la scelta dei sensori, indica criteri sulle incertezze di misura, considerazioni su precauzioni ed accortezze, criteri per l'archiviazione e l'analisi dei dati. In particolare, la scelta dei trasduttori terrà conto della specifica tipologia di fenomeno fisico-chimico a cui è sottoposta l'attrezzatura a pressione.

Le motivazioni che inducono all'implementazione del sistema di monitoraggio sono fondamentalmente riconducibili a tre aspetti:

- programma razionale della manutenzione:
è associata alla possibilità di classificare il degrado dell'attrezzatura in base all'entità del danno. L'attività manutentiva può così concentrarsi sulle apparecchiature con più gravi processi di degrado. Se, tramite il monitoraggio, si riuscisse a determinare l'evoluzione dei fenomeni di danneggiamento, si potrebbe mirare ad una ottimizzazione dell'uso delle risorse economiche, secondo gerarchie di criticità.
- estensione della vita residua:
applicata soprattutto per l'esercizio di strutture di grande rilevanza economica e funzionale. Il prolungamento della vita residua si basa sulla conoscenza storica. In tal senso gli esiti del monitoraggio sono elementi indispensabile di analisi.
- approfondimento della conoscenza del comportamento delle apparecchiature:
il monitoraggio è uno strumento per l'archiviazione dell'esperienza operativa che comporta la validazione tramite una approfondita analisi del loro funzionamento permettendo può indirizzare, ad esempio, la programmazione delle attività manutentive.

Mentre gli obiettivi che si pone il sistema di monitoraggio sono fondamentalmente due:

- controllo delle condizioni di esercizio:
il sistema è progettato in modo da acquisire ed analizzare costantemente i valori di esercizio (es. pressione, temperatura, ecc) e dell'eventuale superamento dei limiti previsti dal fabbricante. Il confronto tra valori misurati e valori limite consente il mantenimento delle condizioni di sicurezza.
- individuazione di eventuali processi di degrado in atto:
il sistema di monitoraggio permette di individuare comportamenti anomali. È richiesto un modello di riferimento della struttura accurato, che sia in grado di riprodurre i meccanismi degradanti possibili e di raffrontarli ai dati rilevati quelli derivanti dai trasduttori. In tal caso un importante e strategico contributo può essere fornito dall'intelligenza artificiale.

Con il sistema di monitoraggio viene prestata particolare attenzione ai casi in cui lo stesso fenomeno correlato all'esercizio possa determinare condizioni di degrado che potrebbero influenzare negativamente la conduzione in sicurezza.

Nella specifica viene riportata una panoramica, esemplificativa e non esaustiva, dei possibili meccanismi di danno correlabili ai fattori caratteristici (es. temperatura, pressione, vibrazioni, livello, ecc) dell'esercizio di attrezzature a pressione.

| MECCANISMO DI DANNO | PARAMETRO DELL'ESERCIZIO CHE POTREBBE EVIDENZIARLO |
|---------------------|--|
| Fatica | <ul style="list-style-type: none"> • Temperatura • Pressione • Vibrazione |
| Infragilimento | <ul style="list-style-type: none"> • Temperatura |
| Corrosione | <ul style="list-style-type: none"> • Livello • Vibrazioni |

Tabella 1. Possibili fenomeni di degrado rilevabili mediante trasduttori installati sull'attrezzatura

La tecnologia oggi fornisce molteplici proposte commerciali di soluzioni innovative che permettono l'attuazione ed implementazione di un approfondito e mirato processo di monitoraggio. I processi di monitoraggio possono essere condotti in forma continua o discontinua, con l'ausilio di apposita apparecchiatura elettronica per la gestione del segnale, in locale o in remoto, anche in forma wireless. In linea generale le indicazioni fornite sono da riferirsi all'impiego di sistemi digitali di acquisizione, i quali si interfacciano successivamente con i sistemi di trasmissione e analisi dei dati.

L'elaborazione dei dati permette di esaminare andamenti e velocità dei fenomeni permettendo la formulazione di valutazioni a breve, medio e lungo periodo.

In particolare, vengono presi in esame, i parametri di tipo fisico-chimico da monitorare, ad esempio: temperatura, pressione e vibrazioni. In appendice alla specifica vengono inoltre forniti suggerimenti per la progettazione di un sistema di monitoraggio indicando gli aspetti da approfondire come ad esempio: i parametri da misurare, la selezione e scelta dei trasduttori, la scelta delle posizioni e modalità di posa dei trasduttori, criteri per la trasmissione dei dati, strumentazione per il condizionamento dei segnali, interfaccia per l'elaborazione ed archiviazione dei dati. I dati assumono una valenza anche per la diagnosi¹. L'analisi dei dati attraverso la rielaborazione statistica possono determinare nuovi elementi di conoscenza che permettono l'individuazione di fenomeni di degrado o l'identificazione di cause/effetti correlati all'esercizio in condizioni normali ed anormali.

2. Definizioni

Il linguaggio presente nell'ambito del monitoraggio utilizza diversi termini portanti che richiedono una puntuale definizione. Ai fini della specifica tecnica UNI/TS 11325-13 si applicano i termini e le definizioni di cui alla UNI EN 764-1.

Di seguito il commento e la differenza che caratterizza il monitoraggio ed il sistema di monitoraggio. Il monitoraggio delle attrezzature a pressione comporta una serie di misure strumentali finalizzate alla conoscenza quantitativa nel tempo dei parametri di esercizio. Mentre con il sistema di monitoraggio si intendono tutti i sistemi di misura e tutti gli apparati per l'esame e la gestione dei dati acquisiti.

Si evidenzia che nel testo si differenzia il termine di sensore da trasduttore. Il sensore è un dispositivo in grado di rilevare le variazioni di una grandezza fisica, mentre si definisce trasduttore un dispositivo che trasforma una grandezza fisica in una grandezza elettrica. Il mercato odierno tende ad assemblare in un unico dispositivo più funzioni, pertanto, sono molto diffusi i trasduttori.

3. Componenti principali di un sistema di monitoraggio

Un sistema di monitoraggio è sostanzialmente costituito da 4 macro unità principali:

- I trasduttori differenziati per singola grandezza da misurare;
- il sistema di acquisizione dati;
- il sistema di trasferimento dei dati dal punto di acquisizione a quello di utilizzo;
- il sistema di elaborazione ed archiviazione dei dati.



¹ tale termine "deriva dal greco antico *diágnōsis*, da *diaghignóskein* (capire), formato da *diá* (attraverso) + *ghignóskein* (conoscere). La diagnosi è quindi, in generale, l'identificazione della natura e/o la causa di qualcosa, di qualsivoglia natura

Figura 1. Rappresentazione sintetica dell'architettura di un sistema di monitoraggio

4. Sistema di monitoraggio

4.1. Generalità e finalità

La presente specifica tecnica prevede in fase di progettazione del sistema di monitoraggio una serie di input importanti per le scelte da effettuare. Si evidenziano i seguenti fattori:

- Impianto/fluidi/processi/attrezzature/dimensioni;
- grandezza o fenomeno fisico con i relativi valori di range operativi massimi;
- condizioni fisico-ambientali comprese le fonti di disturbo/interferenza;

In generale il monitoraggio viene attuato per perseguire le seguenti finalità:

- controllare il rispetto di valori massimi di esercizio;
- fornire dati in tempo reale e nel tempo per lo studio del processo.

4.2. Modalità di trattamento dei dati e frequenze di acquisizione

L'acquisizione dei dati deve comprendere i periodi di effettivo esercizio compresi gli archi temporali temporanei di avviamento e spegnimento. Non sono oggetto di acquisizione i periodi di fermo impianto ove documentati.

L'utilizzatore, sulla base del processo e dello storico, definisce la frequenza di acquisizione. In sede di progettazione del sistema di monitoraggio è significativa la definizione della frequenza di campionamento in quanto non deve essere tale da ingolfare il sistema di archiviazione ma deve comunque evidenziare le variazioni in esercizio.

La specifica indica una frequenza di riferimento pari a una lettura l'ora, salvo indicazioni specifiche correlate al processo (es. processi caratterizzati da variazioni cicliche significative; periodi transitori e/o manovre di regolazione, ecc).

I dati presenti nel data base dovrebbero essere di tipo "aperto" in modo tale da permetterne l'importazione/esportazione senza comprometterne l'autenticità.

4.3. Archiviazione e presentazione dei dati

I dati in formato digitale per poter essere esaminati ed effettuare delle considerazioni devono essere relativi ad un periodo compreso tra 6 mesi e 2 anni. Le considerazioni vengono effettuate prendendo in esame il valore medio e la deviazione standard.

La specifica consiglia, per effettuare le valutazioni, la visualizzazione tramite rappresentazione grafica degli andamenti nel tempo.

L'archiviazione dei dati ha un notevole significato in quanto permette l'analisi storica. I tempi di conservazione dei dati si consiglia siano almeno di 2 anni e comunque per un arco temporale coerente alle considerazioni da effettuare (es. valutazione della vita residua nel caso di scorrimento viscoso).

5. Approccio PDCA

Il ciclo PDCA² è un processo iterativo per migliorare continuamente processi, ed è diventato parte integrante di ciò che oggi è noto come Lean Management.

Il modello PDCA include progettualità, test, analisi dei risultati e miglioramento del processo.

5.1 Plan - Pianificazione

Il processo ha inizio con la fase di pianificazione che prevede la successione delle seguenti principali fasi lavorative:

- a) relazione iniziale con esposizione del sito produttivo e del processo/impianto oggetto di monitoraggio. In questa fase possono ritenersi utili supporti le tavole grafiche e gli schemi funzionali (es. P&ID);
- b) indicazione degli items e delle relative grandezze significative da monitorare. Se opportuno valutare i vari range operativi e le accuratezze richieste per le misure;
- c) indicazione preventiva dei vincoli normativi e/o legislativi (ove presenti) e dei fattori ambientali che possono influire nel processo (per esempio: sorgenti di disturbo, distanze, accessi, compatibilità con infrastrutture esistenti, ecc.);
- d) selezione delle infrastrutture da installare tenendo conto degli aspetti tecnici sopra menzionati

5.2 Do - Fare

Conclusa la pianificazione il ciclo di Deming prevede la fase di realizzazione (Do) attraverso le fasi:

- e) elaborazione di un computo di dettaglio con la verifica della compatibilità di assemblaggio globale tenendo conto dei data sheet dei singoli componenti;
- f) attivazione dell'iter di fornitura e posa in opera con successivi collaudi di funzionamento finali;
- g) messa in esercizio del sistema di monitoraggio con rilevazione dei dati.

5.3 Check - Verifica

La metodica prevede in itinere momenti di attività di verifica per assicurare che quanto realizzato sia in linea con le fasi di pianificazione progettuale ed acquisizione dei dati in esercizio. Le attività di verifica sono pertanto molteplici e riguardano:

- h) effettuazione di verifiche ispettive interne;

² Il termine PDCA Cycle è in realtà un acronimo anglosassone in cui le lettere hanno il seguente significato: Plan: Pianificazione delle attività propedeutiche; Do: Applicazione in via sperimentale di quanto pianificato; Check: Controllo e monitoraggio dei risultati, dei dati ed evidenze, e verifica della compatibilità con quanto pianificato; Act: Implementazione dei miglioramenti scaturiti dalle evidenze raccolte nelle verifiche.

- i) analisi delle non conformità registrate (es. anomalie di funzionamento, fuori servizio, ecc);
- j) considerazioni operative correlate a requisiti legislativi o di buona prassi.

5.4 Act - Azione

La quarta ed ultima fase del ciclo pensato da Deming, ovvero "azione" (Act), comprende le nuove iniziative da implementare per migliorare le performance.

- k) formalizzazione di un riesame del sistema di gestione del monitoraggio con indicazione dei vari dati impiegati come input;
- l) indicazione delle soluzioni da adottare ovvero i conseguenti output.

Le singole suddette fasi sono pensate in successione temporale ma per ognuna di esse possono coesistere simultaneamente più fasi. Pertanto è utile programmare le singole attività e prevedere la loro interconnessione temporale. Un esempio di scheduling delle varie fasi del PDCA è riportato in tabella 2.

| | | Tempo | | | | | | | | | | | | |
|------|-----------|-------|----|----|----|----|----|----|----|----|---------|---------|-----|--|
| | | t1 | t2 | t3 | t4 | t5 | t6 | t7 | t8 | t9 | T1 0 | T1 1 | t12 | |
| Fase | PLAN | a | █ | | | | | | | | | | | |
| | | b | | █ | | | | | | | | | | |
| | | c | | | █ | | | | | | | | | |
| | | d | | | | █ | | | | | | | | |
| | DO | e | | | | | █ | | | | | | | |
| | | f | | | | | | █ | | | | | | |
| | | g | | | | | | | █ | | | | | |
| | CHEC K | h | | | | | | | | | | | | |
| | | i | | | | | | | | | | | | |
| | | j | | | | | | | | | | | | |
| | ACT | k | | | | | | | | | | | | |
| | | l | | | | | | | | | | | | |

Tabella 2. Esempio di scheduling delle attività per l'implementazione di un sistema di monitoraggio su un arco temporale di 12 unità di tempo

6. Conclusioni

La specifica tecnica fornisce indicazioni in merito alle caratteristiche del sistema di monitoraggio dei parametri fisico-chimici correlati ed influenti nell'esercizio delle attrezzature ed insiemi a pressione. In particolare, la specifica tecnica indica, in riferimento ai meccanismi di danno potenzialmente attivi sulle attrezzature: i possibili parametri oggetto di monitoraggio, la tipologia di componentistica

impiantistica da utilizzare, la frequenza di acquisizione e le modalità di presentazione ed archiviazione dei dati. Questa metodica si incardina nel più ampio contesto della gestione della manutenzione. Ieri gli approcci erano prevalentemente di tipo "reattivo" al guasto, oggi si cerca, grazie all'ampia disponibilità ed elaborazione dei dati, di operare nella forma "predittiva". Possibili futuri sviluppi della specifica potrebbero riguardare le potenzialità offerte dall'intelligenza artificiale per l'analisi dei dati e per l'identificazione di condizioni di criticità.

7. Bibliografia

- [1] specifica tecnica UNI/TS 11325-13 "Attrezzature a pressione - Messa in servizio ed utilizzazione delle attrezzature e degli insiemi a pressione - Parte 13: Guida alla realizzazione di un sistema di monitoraggio dei dati di esercizio di attrezzature a pressione". versione draft
- [2] Norma UNI/TR 11634 "Linee Guida per il monitoraggio strutturale" 2016
- [3] Bendul, Julia C., and Henning Blunck. The design space of production planning and control for industry 4.0. *Computers in Industry* 105 (2019): 260-272.
- [4] Pellionisz, P., and P. Szücs. Acoustic emission monitoring of pressure vessels. *International journal of pressure vessels and piping* 55.2 (1993): 287-294.
- [5] Hufenbach, W., et al. Damage monitoring in pressure vessels and pipelines based on wireless sensor networks. *Procedia Engineering* 10 (2011): 340-345.
- [6] Sedmak, Aleksandar, et al. Structural integrity and life assessment of pressure vessels-risk based approach. *Experimental and Computational Investigations in Engineering: Proceedings of the International Conference of Experimental and Numerical Investigations and New Technologies, CNNTech 2020*. Springer International Publishing, 2021.
- [7] Anastasopoulos, A., et al. Acoustic emission monitoring for detecting structural defects in vessels and offshore structures. *Ships and Offshore Structures* 4.4 (2009): 363-372.
- [8] Taufik, D. PDCA cycle method implementation in industries: a systematic. *IJEM (Indones J Ind Eng Manag)* 1 (2020): 157-166.
- [9] Fang, Hongping, and Kangling Fang. The design of remote embedded monitoring system based on internet. *2010 International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation*. Vol. 3. IEEE, 2010.

Accumulatori idraulici installati negli aerogeneratori: misure di sicurezza per il controllo della pressione di esercizio

G. Grillone¹, A. Muratore², R. Sunseri¹, S. Festa³, V. Nastasi¹

¹Inail - Uot di Palermo

²Inail - Uot di Como

³Inail - Uot di Catania

Abstract

Le energie rinnovabili rappresentano l'elemento portante della transizione energetica. Tra queste energie, negli ultimi anni l'energia eolica (insieme a quella solare) si è largamente diffusa grazie all'innovazione tecnologica e alla produzione di aerogeneratori sempre più performanti (es. la moderna turbina E-126 può produrre fino a 7 MW).

All'interno degli aerogeneratori sono contenute attrezzature a pressione (accumulatori idraulici), il cui uso può comportare rischi per la sicurezza e salute del personale addetto alla sorveglianza e alla manutenzione degli aerogeneratori stessi, qualora non siano adeguatamente gestiti.

Gli accumulatori idraulici, installati nella navicella dell'aerogeneratore, fanno parte del sistema idraulico (dotato di una vasca di olio) che regola il passo delle pale eoliche (i.e. la velocità delle pale) e per il funzionamento del sistema frenante. I suddetti accumulatori, costruiti nell'Unione Europea seguendo la direttiva europea PED (Pressure Equipment Directive) 2014/68/UE, possono sopportare una pressione massima di esercizio superiore a 300 bar. Per tali attrezzature, in Italia, il gestore dell'aerogeneratore, dopo la corretta installazione e la relativa analisi dei rischi, deve richiedere all'INAIL la messa in esercizio (Decreto del Ministero delle Attività Produttive n. 329, pubblicato in data 1° dicembre 2004) e la prima verifica periodica (Decreto del Ministero delle del Lavoro e delle Politiche Sociali pubblicato in data 11 Aprile 2011).

Alla luce dell'esperienza in campo degli autori, scopo del presente articolo è: 1) fornire ai gestori degli aerogeneratori un'impostazione organica per una corretta gestione delle attrezzature a pressione, onde prevenire il rischio di incidenti, partendo dalla fase costruttiva degli apparecchi fino alla fase di uso degli stessi; 2) rendere edotti i gestori degli aerogeneratori sugli adempimenti normativi italiani relativi alle attrezzature a pressione presenti negli aerogeneratori (i.e. accumulatori idraulici).

Keywords: Rischio Attrezzature a Pressione, Accumulatori Idraulici, Sicurezza sul Lavoro, Direttiva Europea PED.

1. Introduzione

Gli accumulatori idraulici, installati nella navicella dell'aerogeneratore, fanno parte del sistema idraulico (dotato di una vasca di olio) dell'aerogeneratore, che ha la funzione di regolare il passo delle pale eoliche e il funzionamento del sistema frenante.

I suddetti accumulatori, costruiti nell'Unione Europea seguendo la direttiva europea PED (Pressure Equipment Directive) 2014/68/UE [1], sono attrezzature a pressione che possono sopportare una pressione massima di esercizio, P_s , superiore a 300 bar. Considerati gli alti valori di P_s , il personale che opera negli aerogeneratori è da considerarsi a rischio per la propria sicurezza e salute, specialmente nelle aziende di piccole e medie dimensioni.

Scopo del presente articolo è fornire al Datore di Lavoro/gestore dell'aerogeneratore (di seguito denominato DLGA) un quadro sintetico e completo sull'uso in sicurezza degli accumulatori idraulici che si trovano nell'aerogeneratore stesso, specificando quali sono le fasi principali che permettono di controllare e valutare il rischio "pressione" durante l'uso delle suddette attrezzature di lavoro (per uso di un'attrezzatura di lavoro si intende qualsiasi operazione lavorativa connessa alla stessa attrezzatura, quale la messa in servizio o fuori servizio, l'impiego, il trasporto, la riparazione, la trasformazione, la manutenzione, la pulizia, il montaggio e lo smontaggio dell'attrezzatura suddetta), e renderli edotti sugli adempimenti normativi italiani relativi agli accumulatori idraulici suddetti.

2. Il Sistema Idraulico dell'aerogeneratore

Il Sistema idraulico dell'aerogeneratore è costituito normalmente da una centralina idraulica con pompe e filtri, posizionata nella navicella e da altri componenti, tra i quali vi sono gli accumulatori idraulici. La centralina idraulica fornisce olio, in pressione, ai diversi sistemi idraulici della turbina e risulta costituita principalmente da: a) filtro olio, b) sistema di pompaggio, c) valvole di sfiato, d) valvola di massima pressione, d) circuito del freno.

Il sistema di pompaggio ha normalmente due pompe ridondanti e mette in pressione l'olio idraulico prelevato dalla vasca. Le pompe sono azionate da motori generalmente trifase che consentono di mantenere la pressione dell'olio entro un determinate range (esempio: pressione tra i 235 e 260 bar; temperature sotto i 40° C; portata di ciascuna pompa pari a 25÷30 l/min).

In base alla pressione del circuito e all'attività del sistema del passo delle pale, la pompa può funzionare in "pump mode" oppure in 'relief mode'. Il 'Pump mode' si mette in funzione per attività del passo delle pale bassa: la pompa funziona in maniera discontinua; essa inizia a funzionare per un fissato valore di pressione minima e si ferma al raggiungimento del valore di pressione pari a quella di esercizio.

Il 'Relief mode' è attivato se l'azionamento è molto frequente: la pompa in questo caso è attivata in modo continuo e la pressione è regolata dall'apertura e chiusura della valvola di sfiato.

I dispositivi di sicurezza previsti nel sistema idraulico sono dei sensori di:

1. pressione dell'olio;
2. temperatura dell'olio;
3. livello dell'olio.

I sensori di pressione dell'olio consentono di misurare costantemente sia la pressione sul circuito del passo, che la pressione sul circuito frenante e permettono al sistema di controllo della turbina di attivare e disattivare il sistema di pompaggio. La pressione delle pompe che alimenta il sistema idraulico dell'aerogeneratore è generalmente nell'intervallo 235 ÷ 260 bar, inferiore alla pressione di taratura della valvola di sovrappressione (intorno a 275 bar), mentre la pressione massima di esercizio per la quale sono progettati e fabbricati gli accumulatori idraulici è di circa 300 ÷ 330 bar.

Durante il normale funzionamento la pressione viene regolata da un pressostato grazie al quale, se il circuito idraulico supera una soglia fissata (ad esempio 260 bar), l'alimentazione ai motori delle pompe viene interrotta. Nello sfortunato caso di mancato arresto delle pompe (per esempio per malfunzionamento del pressostato o altro), interviene la valvola di sovrappressione o di sicurezza (per esempio tarata a 275 bar sulla centralina idraulica). Il sistema di sicurezza descritto garantisce che la pressione nel circuito idraulico rimanga sempre al di sotto della pressione massima ammissibile di esercizio delle attrezzature a pressione (300 ÷ 330 bar).

Il sensore di temperatura consente di mettere in "pausa" la turbina in caso di temperatura dell'olio idraulico troppo alta (inferiore al punto di infiammabilità dell'olio, circa 65 °C) ovvero troppo bassa (tale valore deve essere tale che in funzione del tipo di olio, lo stesso deve rimanere sempre allo stato fluido).

A tal proposito nelle istruzioni d'uso degli accumulatori, i fabbricanti ricordano che gli stessi: a) devono essere precaricati con azoto e mai con aria o ossigeno, in quanto in questo caso si aggiunge il rischio di esplosione; b) sono da evitare interventi meccanici o lavori di saldatura e brasatura in quanto vi è un rischio di scoppio dei recipienti in pressione. Inoltre, bisogna informare gli addetti alla manutenzione che il corpo dell'accumulatore può raggiungere temperature superiori ai 50°C per anomalie di funzionamento, che possono causare gravi ustioni agli stessi.

Si evidenzia che la temperatura di esercizio ammessa è indicata nella dichiarazione di conformità rilasciata dal fabbricante, secondo quanto previsto dalla direttiva europea PED 2014/68/EU [1] e dipende dal corpo dell'accumulatore e della sacca.

Il sensore di livello dell'olio consente di fermare la turbina in caso di valori bassi, che potrebbero causare un anomalo o mancato funzionamento del sistema idraulico.

3. Accumulatori idraulici installati nell'aerogeneratore

Gli accumulatori idraulici installati all'interno della navicella dell'aerogeneratore sono generalmente del tipo "a sacca". La sacca è caricata internamente di azoto (pressione pari a circa 110 bar) e serve ad assorbire e rilasciare l'olio in pressione del circuito idraulico, in modo da mantenere il circuito stesso in pressione in maniera continuativa anche se le pompe idrauliche non dovessero essere in funzione, perché poste in condizioni di emergenza e/o guasto o ferme per altre ragioni.

Inoltre gli accumulatori idraulici hanno la funzione di regolare il passo delle pale (ossia la velocità delle pale), nonché il sistema frenante dell'aerogeneratore. Il compito principale del sistema della regolazione del passo è di muovere le pale con un controllo finalizzato ad ottimizzare la produzione di energia ed azionare, in determinati casi, il freno aerodinamico. Il sistema del passo permette il controllo della velocità di rotazione del rotore, dei carichi e l'arresto del rotore. Pertanto, gli accumulatori idraulici sono componenti di fondamentale importanza per il funzionamento in sicurezza dell'intero aerogeneratore.

In genere nella navicella degli aerogeneratori di recente fabbricazione si trovano diversi accumulatori idraulici a sacca (secondo quanto rilevato dagli autori nella propria esperienza sino a un massimo di 4, con capacità maggiore di 25 litri), costruiti per sopportare una pressione massima di esercizio (Ps) di oltre 300 bar, ed una temperatura massima di esercizio Ts compresa tra - 20 ° C e 80 ° C. Questa tipologia di accumulatori idraulici rientra nella IV^a categoria di rischio per le attrezzature a pressione secondo la direttiva europea PED n. 2014/68/EU [1] (massima categoria di rischio per le attrezzature a pressione).

In figura 1 si riporta la tabella 2 (fluido non pericoloso) della Direttiva PED n. 2014/68/EU [1] secondo la quale, per un volume di 30 litri di un accumulatore idraulico (in ascisse) ed una pressione massima di esercizio (Ps) di 300 bar (in ordinate), si determina la categoria di rischio PED per l'attrezzatura considerata, pari a IV.

Nella figura 2 si riporta uno schema di un accumulatore idraulico a sacca, mentre la figura 3 riporta una foto rappresentativa di due accumulatori idraulici installati all'interno della navicella di un aerogeneratore del Parco eolico di Mazara del Vallo (provincia di Trapani), verificati dai tecnici degli uffici territoriali INAIL di Palermo nel 2022.

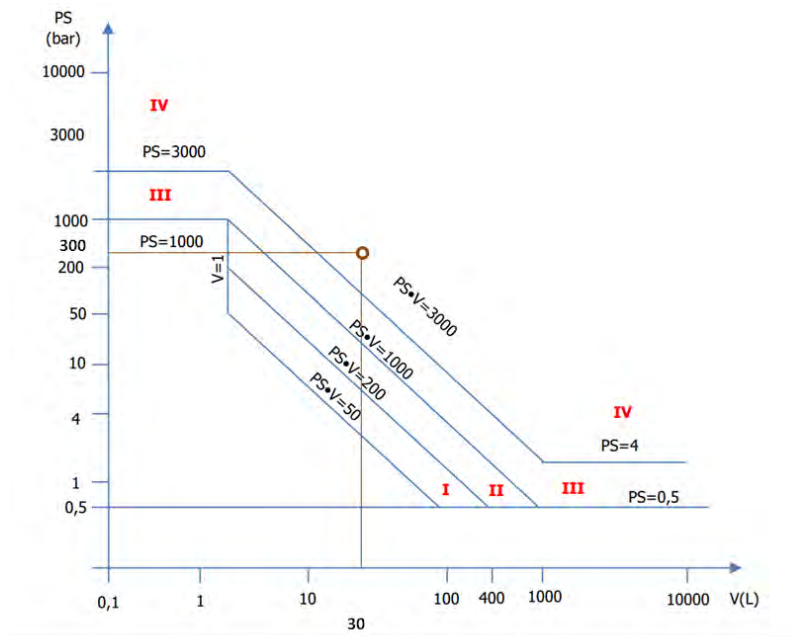


Figura 1. Tabella 2 della Direttiva PED n. 2014/68/EU [1], che consente di individuare la categoria di rischio (categorie di rischio = I÷IV, dove I è il rischio più basso e IV il rischio più alto) nel caso di fluido non pericoloso.

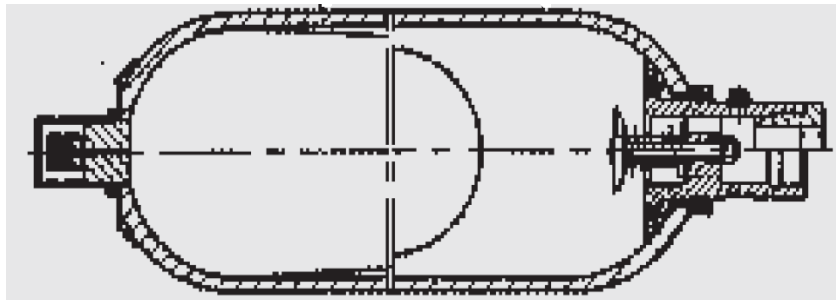


Figura 2. Schema di un accumulatore idraulico a sacca estratto dal manuale d'uso della ditta HYDAC International (codice manuale: INT 3.201.BA11/02.19, anno 2019, [2]) e installato negli aerogeneratori del parco eolico di Mazara del Vallo.



Figura 3. Fotografia di due accumulatori idraulici installati all'interno della navicella di un aerogeneratore del Parco eolico di Mazara del Vallo (prov. TP), eseguita dagli autori

4. Accumulatori idraulici installati nell'aerogeneratore: prevenzione e valutazione del rischio pressione, verifiche di funzionamento e verifiche di integrità decennali

Le fasi principali che consentono di prevenire e valutare il rischio "pressione" durante l'uso degli accumulatori idraulici installati negli aerogeneratori sono riassumibili nei seguenti step:

1. Step 1: Riscontro della conformità documentale. All'interno dell'Unione Europea (UE) il datore di lavoro/gestore dell'aerogeneratore (DLGA) deve riscontrare la conformità documentale delle attrezzature a pressione che si trovano all'interno dell'aerogeneratore, progettate e costruite secondo la direttiva comunitaria PED (Pressure Equipment Directive) 2014/68/EU [1], acquisendo dal fabbricante delle suddette attrezzature: a) la dichiarazione di conformità CE alla direttiva PED 2014/68/EU [1]; b) il/i manuale/i d'uso e manutenzione delle attrezzature. In aggiunta, il DLGA deve controllare la presenza di "carenze palesi" degli accumulatori idraulici, ossia verificare che seguano le disposizioni legislative e regolamentari di recepimento delle direttive della UE, che erroneamente il fabbricante non ha seguito in fase di progettazione e costruzione, riscontrando altresì se gli accumulatori idraulici hanno subito danni durante il trasporto o montaggio degli stessi.
2. Step 2: Manutenzione delle attrezzature. Il datore di lavoro/gestore dell'aerogeneratore (DLGA) deve fare effettuare nel tempo gli interventi di manutenzione e i controlli degli accumulatori (eseguiti con proprio personale, già competente o adeguatamente formato ovvero con idoneo personale esterno specializzato) seguendo le indicazioni del manuale d'uso e manutenzione fornito dal fabbricante. Gli interventi manutentivi, ordinari o straordinari, devono essere sempre registrati dal datore di lavoro in un apposito registro di controllo. Inoltre in diversi paesi della UE, in aggiunta ai controlli prescritti dal fabbricante, occorre effettuare idonee verifiche periodiche fissate da leggi nazionali.
3. Step 3: In Italia il datore di lavoro/gestore dell'aerogeneratore (DLGA) deve comunicare la messa in servizio delle attrezzature suddette all'INAIL (Istituto Nazionale per l'Assicurazione contro gli Infortuni sul lavoro), esclusivamente on-line tramite l'applicativo informatico "CIVA" (disponibile nel sito web INAIL), ricevendo a sua volta dall'INAIL una matricola identificativa per ciascuna attrezzatura. Dopo aver ricevuto le matricole di tutte le attrezzature di lavoro, il datore di lavoro/gestore dell'aerogeneratore (DLGA) fa sottoporre le suddette attrezzature a pressione a verifica di messa in servizio da INAIL, secondo quanto previsto dal Decreto del Ministero delle Attività Produttive n. 329 del 01/12/2004 (d.m.a.p. 329/04 [3]), che prevede l'esenzione della verifica degli accumulatori idraulici con capacità inferiore a 25 litri.

In questa fase si può seguire la specifica tecnica UNI/TS 11325-6 [4]. Tale specifica prevede che la verifica di messa in servizio si svolga secondo le seguenti fasi:

- Esame della documentazione tecnica predisposta (es. relazione tecnica con lo schema di impianto recante le condizioni di installazione e di esercizio, le misure di sicurezza, protezione e controllo adottate, etc. etc.);
 - Identificazione e verifica della corretta installazione dell'attrezzatura in pressione (Accumulatore Idraulico);
 - Verifica dell'esistenza e della funzionalità dei sistemi di sicurezza dell'attrezzatura a pressione posti a corredo dell'impianto.
4. Step 4: Dopo la fase di messa in servizio dell'attrezzatura a pressione, il DLGA fa sottoporre le suddette attrezzature a pressione ad idonee verifiche periodiche (d.lgs. 81/08 [5], d.m.l.p.s. 11/04/2011 [6], UNI/TS 11325-12 [7]), seguendo la periodicità dell'Allegato VII del d.lgs. 81/08 [5], ed in particolare a:
- a. Prima verifica periodica dell'attrezzatura a pressione. La normativa italiana prevede che la prima verifica periodica dell'attrezzatura a pressione sia affidata all'INAIL, che deve provvedere (direttamente o attraverso l'incarico conferito ad un Ente Privato, autorizzato Ministero del Lavoro e scelto dal DLGA, denominato di seguito SA) entro 45 giorni dalla richiesta della stessa. Decorso tale termine, il DLGA provvede ad affidare la verifica ad un SA di sua scelta.
Si evidenzia che per detta prima verifica periodica l'INAIL ha predisposto apposite istruzioni [8], le quali pur non costituendo un riferimento vincolante, vogliono proporsi come esempio di armonizzazione su scala nazionale ai fini della conduzione della verifica che possono essere di pratica utilità per i soggetti coinvolti (SA e operatori di Aziende Sanitarie Locali, ASL, Agenzie Regionali per la Protezione dell'Ambiente, ARPA), anche al fine di garantire indicazioni e comportamenti coerenti all'utenza. Per queste verifiche oltre a rilasciare un apposito verbale di verifica occorre predisporre da parte del verificatore una scheda tecnica di identificazione per l'attrezzatura a pressione (allegato IV al d.m.l.p.s. 11/04/2011 [6]). Detta prima verifica consiste nella verifica di funzionamento di cui al punto 4.3.1 del d.m.l.p.s. 11/04/2011 [6].
 - b. Verifiche periodiche delle attrezzature a pressione successive alla prima. Il DLGA deve far effettuare le verifiche periodiche delle attrezzature a pressione, successive alla prima, dalle strutture regionali competenti (ASL/ARPA), ovvero da un SA dei Soggetti Abilitati operativi nell'ambito regionale interessato (d.lgs. 81/08 [5], d.m.l.p.s. 11/04/2011 [6]). Le ASL/ARPA/SA dovranno effettuare le verifiche entro trenta giorni dalla richiesta del DLGA. Queste verifiche possono essere suddivise in due tipologie (d.m.a.p. 329/04 [3], UNI/TS 11325-12 [7]): 1) verifiche di funzionamento; 2) verifiche di integrità decennali.

La verifica di funzionamento degli accumulatori idraulici presenti nell'aerogeneratore (in Italia da eseguirsi al massimo ogni 3 anni in quanto il fluido è

“non pericoloso”, vedi: d.m.a.p. 329/04 [3], d. lgs. 81/08 [5] e d.m.l.p.s. 11/04/2011 [6]), si svolge secondo le seguenti fasi:

- a. esame documentale;
- b. verifica di funzionalità dei dispositivi di protezione;
- c. verifica dei parametri operativi.

In merito all'esame documentale (punto a.) si deve accertare:

- la corrispondenza della dichiarazione CE-PED con l'attrezzatura in verifica;
- l'esistenza e la corrispondenza delle istruzioni d'uso con l'attrezzatura in verifica;
- l'esistenza e la regolare tenuta del registro di manutenzione (art. 71 c.8 d.lgs. 81/08 [5]);
- la corretta installazione dell'attrezzatura in verifica;
- l'esistenza e la corrispondenza degli schemi e dei disegni P&I (P&I=tubazioni e strumentazioni), della relazione tecnica e della documentazione relativa ai dispositivi di protezione e controllo con l'attrezzatura in verifica.

Per quanto riguarda la verifica di funzionalità dei dispositivi di protezione (punto b.), si propone di eseguire la stessa con le disposizioni contenute nel punto 4.4.4 della UNI/TS 11325-6 [4]. In particolare, viste la pressione di taratura elevata delle valvole di sovrappressione (circa 275 bar), normalmente la verifica di funzionalità può essere sostituita riscontrando la presenza del certificato di taratura, che deve essere recente e comunque entro i limiti raccomandati dal costruttore del dispositivo. Si precisa altresì che le valvole di sovrappressione presenti nel sistema idraulico dell'aerogeneratore devono essere dimensionate in modo da consentire il rilascio della portata d'olio stimata più alta, secondo una valutazione di un tecnico delegato dal DLGA, in funzione delle seguenti cause che possono determinare l'intervento delle valvole stesse:

1. anomalie di esercizio, quali errori di manovra, disservizi dei controlli automatici e dei meccanismi di regolazione automatici compresi i dispositivi di riduzione della pressione, apporto di calore da sorgenti esterne non dovute ad incendio, etc. etc.;
2. incendio esterno, da non considerare quando, secondo la dichiarazione dell'utente, la presenza di sostanze infiammabili, solide o liquide, in quantità tale da alimentare un incendio è da escludere nel locale dove è installata l'attrezzatura in pressione o nelle sue immediate vicinanze.

La verifica dei parametri operativi di funzionamento degli accumulatori idraulici (pressione, temperatura, livello dell'olio dell'apposita centralina che alimenta tutto il sistema idraulico compreso gli accumulatori, etc. etc.) viene effettuata tramite gli accessori di controllo in dotazione dell'aerogeneratore, posti alla base della torre e in navicella dello stesso (figura 4); tali accessori monitorano anche la funzionalità dell'intero circuito idraulico dell'aerogeneratore misurando i parametri necessari.



Figura 4. Display dei parametri operativi di funzionamento degli accumulatori idraulici e del circuito idraulico dell'aerogeneratore (pressione, temperatura, etc. etc.), posto alla base e nella navicella dell'aerogeneratore.

Le verifiche di funzionamento degli accumulatori idraulici presenti negli aerogeneratori, secondo quanto accertato dagli autori durante la propria attività lavorativa svolta per l'INAIL nei parchi eolici della Sicilia Occidentale, in occasione della messa in servizio ovvero della prima verifica periodica degli accumulatori idraulici presenti negli aerogeneratori, hanno avuto quasi sempre esito positivo.

La verifica di integrità decennale delle attrezzature a pressione, e quindi anche degli accumulatori idraulici presenti nell'aerogeneratore, è obbligatoria in Italia essendo la stessa prevista dal d.m.a.p. 329/04 [3] e dal d.m.l.p.s. 11/04/2011 [6]. Per lo svolgimento della stessa si può seguire la UNI/TS 11325 - 12 [7] (punto 4.3) che prevede le seguenti fasi:

- esame documentale;
- valutazione dello stato di conservazione dell'attrezzatura a pressione (accumulatore idraulico) effettuata mediante esame visivo dall'esterno e dall'interno e apposito controllo spessimetrico;
- effettuazioni di eventuali indagini supplementari.

Tale verifica di integrità ha il compito di mostrare, eventualmente, un precoce degrado delle attrezzature a pressione (diminuzione di spessore iniziale dell'involucro, generalizzato o localizzato, etc. etc.), che se non adeguatamente gestito per tempo può portare a gravi incidenti. Tale problematica risulta accentuata negli accumulatori idraulici, considerato che possono funzionare ad una pressione massima di esercizio superiore a 300 bar. In previsione della realizzazione di parchi eolici offshore tali aspetti, visto l'ambiente marino corrosivo, risultano ulteriormente amplificati.

Nel caso in cui dall'esame visivo e/o strumentale si riscontrino difetti che possono pregiudicare il normale esercizio dell'attrezzatura, dovranno essere intraprese opportune indagini supplementari atte a stabilire l'entità del difetto, e, ove possibile,

la sua possibile origine, al fine di intraprendere le azioni più opportune per il ripristino dell'integrità strutturale del componente, oppure a valutarne il grado di sicurezza commisurato al tempo di ulteriore esercizio dell'attrezzatura con la permanenza dei difetti riscontrati.

Ad oggi, le verifiche di integrità decennale degli accumulatori idraulici presenti negli aerogeneratori installati in Italia, secondo quanto noto agli autori, non sono state ancora effettuate in quanto solo da pochi anni gli stessi vengono immatricolati e sottoposti alle procedure di messa in servizio e successiva prima verifica periodica da parte dell'INAIL.

Ad ogni modo, gli autori suggeriscono al DLGA di effettuare un monitoraggio continuo degli accumulatori idraulici con personale esperto, al fine di evidenziare eventuali diminuzioni di spessore dell'involucro di tali attrezzature; la periodicità di questi controlli deve tenere conto del tipo di ambiente ed in particolare se quanto lo stesso ambiente sia corrosivo.

Si consiglia altresì di estendere tali controlli interni e le relative manutenzioni anche alle tubazioni e ai serbatoi in pressione inferiori a 25 litri di capacità che, secondo il d.m. 329/04 [3], sono oggi esclusi dalle verifiche di legge.

Secondo quanto accertato dagli autori durante la propria attività lavorativa svolta per l'INAIL per analoghe attrezzature a pressione (ossia con condizioni di esercizio di pressione e temperatura confrontabili), i risultati delle verifiche di integrità decennali consigliano di programmare la sostituzione l'attrezzatura in pressione qualora si riscontrino fasi iniziali di corrosione. Dal riscontro di tali criticità alla sostituzione dei recipienti in pressione (vista l'elevata pressione di esercizio dell'ordine di 250/300 bar) occorre agire con prudenza, predisponendo fin da subito uno studio sulla vita residua dell'apparecchio curato da un tecnico esperto nel settore.

5. Conclusioni

Il presente articolo ha l'obiettivo di fornire al Datore di Lavoro/gestore degli aerogeneratori le indicazioni tecniche e i riferimenti normativi per l'esercizio in sicurezza degli accumulatori idraulici presenti negli aerogeneratori, dalla messa in servizio delle suddette attrezzature alle diverse fasi di esercizio e di verifica periodica (prima e successiva alla prima).

Le verifiche di messa in servizio e le prime verifiche periodiche degli accumulatori idraulici installati negli aerogeneratori, previste dalla normativa italiana ed eseguite dagli autori, consistenti principalmente nel verificare il corretto funzionamento degli accumulatori stessi e l'adeguatezza dei dispositivi di sicurezza installati, hanno avuto quasi sempre esito positivo (verifiche effettuate in Sicilia Occidentale).

Ad oggi, i controlli decennali di integrità degli accumulatori idraulici installati in aerogeneratori ubicati in Italia non sono stati ancora effettuati perché, solo da pochi anni, i suddetti accumulatori sono immatricolati e sottoposti alle procedure di messa in servizio e successiva prima verifica periodica da parte dell'INAIL. Pertanto,

nei prossimi anni, sono auspicabili ulteriori studi e verifiche su queste apparecchiature a pressione.

Bibliografia

[1] Direttiva 2014/68/UE del Parlamento Europeo e del Consiglio del 15 maggio 2014 concernente l'armonizzazione delle legislazioni degli Stati membri relative alla messa a disposizione sul mercato di attrezzature a pressione (rifusione), Gazzetta ufficiale dell'Unione europea, n. 189 del 27/6/2014, pp. 164-259.

[2] Hydac International, Manuale d'uso accumulatore a sacca, Codice Manuale: INT 3.201.BA11/02.19, 2019.

[3] Decreto Ministero Attività Produttive n. 329 del 01/12/2004 "Regolamento recante norme per la messa in servizio e utilizzazione delle attrezzature a pressione art. 19 del d.lgs. 93/2000". Gazzetta Ufficiale Repubblica Italiana, Serie Generale n. 22 del 28 Gennaio 2005 - Suppl. Ordinario n. 10.

[4] UNI/TS 11325-6:2014 (2014). Attrezzature a pressione - Messa in servizio ed utilizzazione delle attrezzature e degli insiemi a pressione - Parte 6: Messa in servizio delle attrezzature e degli insiemi a pressione.

[5] Decreto Legislativo 9 Aprile 2008, n. 81, integrato e modificato dal Decreto Legislativo 3 Agosto 2009, n. 109. "Attuazione dell'articolo 1 della legge 3 agosto 2007, n. 123, in materia di tutela della salute e della sicurezza nei luoghi di lavoro". Gazzetta Ufficiale Repubblica Italiana, Serie Generale n. 101 del 30 Aprile 2008 - Suppl. Ordinario n. 108; Decreto integrativo: Gazzetta Ufficiale Repubblica Italiana, Serie Generale n. 180 del 05 Agosto 2009 - Suppl. Ordinario n. 142/L.

[6] Decreto Ministero del Lavoro e delle Politiche Sociali 11 Aprile 2011. "Disciplina delle modalità di effettuazione delle verifiche periodiche di cui all'Allegato VII del decreto legislativo 9 aprile 2008, n. 81, nonché i criteri per l'abilitazione dei soggetti di cui all'articolo 71, comma 13, del medesimo decreto legislativo". Gazzetta Ufficiale Repubblica Italiana, Serie Generale n. 98 del 29 Aprile 2011 - Suppl. Ordinario n. 111.

[7] UNI/TS 11325-12:2018 (2018). Attrezzature a pressione - Messa in servizio ed utilizzazione delle attrezzature e degli insiemi a pressione - Parte 12: Verifiche periodiche delle attrezzature e degli insiemi a pressione.

[8] Delle Site C., Artenio E., Mennuti C., Franchi E., Pallano A. Recipienti a pressione - Istruzioni per la prima verifica periodica ai sensi del d.m. d.lgs.11 aprile 2011. INAIL, Milano, Ottobre 2020, 63 pp.

Lista degli Acronimi

ASL = Azienda/e Sanitaria/e Locale/i

ARPA = Agenzia/e Regionale/i per la Protezione dell'Ambiente

DLGA = Datore di Lavoro/Gestore dell'aerogeneratore

d.m.a.p. 329/04 = Decreto Ministero Attività Produttive n. 329 del 01/12/2004

d.m.l.p.s. 11/04/2011 = Decreto del Ministero del Lavoro e delle Politiche Sociali 11
Aprile 2011

d.lgs. 81/08 = Decreto Legislativo 9 Aprile 2008 n. 81

SA = Ente Privato, autorizzato Ministero del Lavoro ad effettuare la prima verifica
periodica