

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE

**CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA DELLA SICUREZZA CIVILE E
INDUSTRIALE**

Tesi di Laurea Magistrale in Ingegneria della Sicurezza Industriale

**VALUTAZIONE DEL RISCHIO DI NUOVI VETTORI
ENERGETICI NEL TRASPORTO: CASO STUDIO DI UN
DISTRIBUTORE DI LNG**

Relatrice: Ing. Chiara Vianello

Laureando: LEO D'ARRIGO

ANNO ACCADEMICO 2021-2022

Indice

Introduzione.....	5
Capitolo 1 - L'analisi del rischio e la valutazione del rischio esplosione.....	7
1.1 Cenni storici.....	7
1.2 La definizione di rischio.....	8
1.2.1 Tipologie di rischio.....	8
1.2.2 Misure di riduzione del rischio	9
1.2.3 Il concetto di grande rischio	10
1.3 Il quadro normativo	11
1.3.1 Le direttive Seveso e la definizione di incidente rilevante.....	11
1.3.2 La valutazione del rischio nel testo unico per la salute e sicurezza nei luoghi di lavoro D.Lgs 81/2008 e s.m.i.....	12
1.3.3 Le direttive ATEX	13
1.3.4 La protezione da atmosfere esplosive nel D.Lgs 81/2008	14
Capitolo 2 - Metodologie di valutazione del rischio	19
2.1 L'analisi del rischio	19
2.2 Metodologia HAZOP.....	21
2.3 Albero dei guasti (FTA- Fault Tree Analysis)	22
2.4 Albero degli eventi (ETA - Event Tree Analysis)	23
Capitolo 3 - Caso studio: Impianto stradale di distribuzione di gas naturale liquefatto (GNL) per autotrazione.....	25
3.1 Il gas naturale liquefatto	25
3.2 Impianti di distribuzione L-GNC/GNL.....	28
3.3 Normativa di riferimento per i distributori stradali.....	28
3.4 Elementi costruttivi dell'impianto	29
3.4.1 Serbatoio criogenico.....	30
3.4.2 Pompe criogeniche.....	31
3.4.3 Vaporizzatori atmosferici di alta pressione.....	32
3.4.4 Vaporizzatore atmosferico di rimessa in pressione del serbatoio GNL.....	32
3.4.5 Bacino di contenimento e recinzione GNL.....	32
3.4.6 Torcia fredda GNL e torcia GNC	33
3.4.7 Punto di riempimento del serbatoio criogenico	33
3.4.8 Tubazioni	34
3.4.9 Impianto elettrico L-GNC/GNL	34
3.4.10 Erogatore GNL	35
3.4.11 Area sosta autocisterna GNL.....	35

3.4.12 Locale di accumulo GNC	35
Capitolo 4 - Analisi del rischio su un impianto stradale di GNL	37
4.1 Applicazione metodologia HAZOP – Hazard & Operability Analysis	37
4.1.1 Stoccaggio.....	37
4.1.2 Erogazione	38
4.1.3 Pompa criogenica di mandata.....	39
4.2 Applicazione metodologia FTA – Fault Tree Analysis	39
4.2.1 Overflow serbatoio.....	40
4.3 Analisi con albero degli eventi	44
4.4 Classificazione dei luoghi con pericolo di esplosione	46
Conclusioni	53
Nomenclatura	55
Riferimenti bibliografici.....	57

Introduzione

Viviamo in un'epoca di transizione energetica. L'obiettivo di abbattere entro il 2050 le emissioni di gas climalteranti sancito dal regolamento 2021/1119/UE determinerà grandi cambiamenti nel mondo dei trasporti.

In questa fase di transizione, nel settore dei trasporti sta trovando sempre più spazio l'utilizzo nuovi vettori energetici come il gas naturale liquefatto. L'obiettivo della presente tesi è quello di effettuare una valutazione dei rischi connessi all'esercizio di un distributore stradale di GNL per autotrazione. Dopo un excursus sulle origini dell'analisi del rischio e sui riferimenti normativi, saranno trattate le tecniche di analisi del rischio prima di essere applicate nel caso in esame di un distributore stradale di GNL.

Capitolo 1

L'analisi del rischio e la valutazione del rischio esplosione

1.1 Cenni storici

Dagli albori della rivoluzione industriale, l'applicazione delle scoperte in campo scientifico ha consentito lo sviluppo esponenziale dei vari settori dell'industria fino ad arrivare ai giorni nostri. Le esigenze produttive contingenti, rapportate alla conoscenza e alla sensibilità riguardo alle tematiche dovute all'interazione tra attività industriali, salute e sicurezza dell'uomo e ambiente, hanno da sempre concorso nella attribuzione di priorità tra le problematiche tecnologiche da risolvere per consentire lo sviluppo.

Attualmente, nel mondo occidentale industrializzato ci si riferisce a una vera e propria “cultura della sicurezza”, dove tale concetto è da intendersi riferito sia in senso stretto alla salute e sicurezza dei lavoratori negli ambienti di lavoro, sia in senso generale rispetto alla salute e sicurezza delle persone nella vita di tutti i giorni, dalle attività domestiche ai servizi e al trasporto.

Quello di sicurezza è un concetto relativo. Vi è sicurezza relativamente alla possibilità o meno che si verifichi un evento sfavorevole e alle sue conseguenze. Prima ancora di definire le grandezze e le tecniche che saranno oggetto di trattazione nella presente tesi, intrinseca al concetto di sicurezza si intuisce la presenza di una componente probabilistica. Un ulteriore aspetto da tenere in considerazione in relazione alla sicurezza è la quantificazione del danno potenziale associato al verificarsi dell'evento sfavorevole. A tal proposito si immagini che, in origine, ogni passo avanti compiuto in termini di sicurezza di impianti e apparecchiature tecnologiche sia costato una perdita in termini di salute, di vite umane, in termini economici o ambientali. Nella prima fase di convivenza tra l'uomo e l'industria, il livello di sicurezza di apparecchiature e impianti è aumentato perlopiù grazie all'esperienza dettata dagli incidenti occorsi. Ebbene, l'individuazione di misure migliorative e preventive è, ancora oggi, uno degli scopi dell'analisi post-incidentale. Storicamente c'è stato però un momento in cui le proporzioni e le concentrazioni raggiunte dagli stabilimenti industriali, nonché la rilevanza degli incidenti potenziali ad essi associati, hanno palesato l'esigenza di altri metodi, oltre a quelli empirici, per prevenire il verificarsi di tali incidenti.

Gli anni Sessanta del secolo scorso hanno coinciso con un momento fondamentale nel progresso della cultura industriale e tecnologica, grazie anche a un interesse della collettività sempre più rivolto verso la compatibilità tra lo sviluppo dell'industria di processo e la salvaguardia dell'ambiente e della salute umana. Campi altamente specifici quali l'industria nucleare, aeronautica e militare, sono stati pionieri

nell'introduzione di una vera e propria disciplina di trattazione sistematica e scientifica degli aspetti legati all'analisi del livello di sicurezza, con tecniche in grado di fornire già in fase progettuale risultati che prima di allora potevano essere ricavati esclusivamente in forma empirica. A partire dagli anni Settanta tali tecniche furono traslate nell'industria chimica e di processo.

1.2 La definizione di rischio

Nel paragrafo precedente sono state introdotte in modo informale due componenti associate al concetto di sicurezza così come la avvertiamo nei confronti di ciò che è stato fin qui definito come il verificarsi di un evento sfavorevole, ovvero una componente legata alla probabilità di accadimento e una componente legata all'entità del danno.

Per rischio R si definisce il prodotto tra la frequenza attesa f di accadimento di un evento indesiderato e la magnitudo M associata all'entità del danno ad esso conseguente, secondo la seguente relazione (1.1):

$$R = f \cdot M . \quad (1.1)$$

Tale relazione determina il fatto che si possa quantificare un rischio ugualmente elevato relativamente a un evento caratterizzato da scarsa frequenza di accadimento e da notevoli danni, oppure a un evento caratterizzato da una maggiore frequenza di accadimento e da danni meno gravi.

1.2.1 Tipologie di rischio

I rischi connessi a qualsiasi attività industriale possono essere classificati nelle seguenti tre tipologie (Figura 1.1):

1. Rischi convenzionali, connessi alle singole attività di lavoro e alle apparecchiature e impianti presenti negli ambienti di lavoro. Tali rischi sono caratterizzati da elevate frequenze di accadimento e, mediamente, dal coinvolgimento di una o due persone;
2. Rischi specifici, originati dalle caratteristiche delle sostanze e dei prodotti chimici utilizzati in un determinato contesto e che per loro natura possono, in tempi brevi, arrecare danno alle persone, alle cose o all'ambiente. Tali rischi sono caratterizzati da eventi continui o molto frequenti, associati a danni generalmente modesti in tempi brevi;
3. Grandi rischi potenziali, derivati dal verificarsi di eventi anomali, con conseguente esplosione e fuoriuscita in tempi brevi di nubi di prodotti tossici o infiammabili in quantità così grande da interessare vaste aree all'interno e all'esterno dello stabilimento. Sono eventi molto rari associati a danni gravissimi.

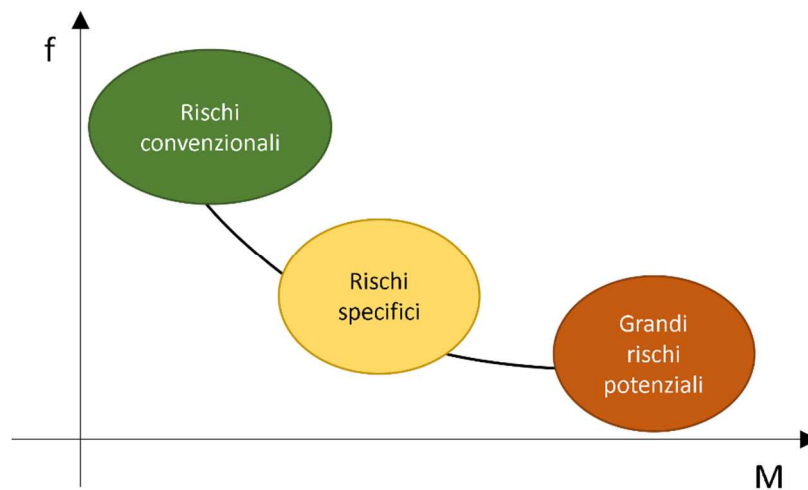


Figura 1.1 – Classificazione delle tipologie di rischio.

1.2.2 Misure di riduzione del rischio

Come si nota nella Figura 1.2 identificate le componenti associate a un certo valore di rischio, è possibile agire limitando quantitativamente il rischio di eventi accidentali attraverso l'adozione di misure di riduzione del rischio. Avendo individuato un certo rischio iniziale R_1 , attraverso l'adozione di misure di carattere preventivo o protettivo è possibile individuare dei punti appartenenti alla curva isorischio R_2 , che comportano la riduzione rispettivamente della frequenza attesa di accadimento o dell'entità dei danni potenziali. Come si nota in figura, il punto 1, appartenente alla curva isorischio R_1 è determinato dal prodotto tra la frequenza e magnitudo iniziali, secondo la relazione (1.2). I punti 2 e 3, appartenenti alla curva isorischio R_2 presentano lo stesso livello di rischio ma sono caratterizzati da differenti valori di frequenza e di magnitudo:

$$R_1 = f' \cdot M'(1) > R_2 = f' \cdot M''(2) = f''' \cdot M'(3) \quad (1.2)$$

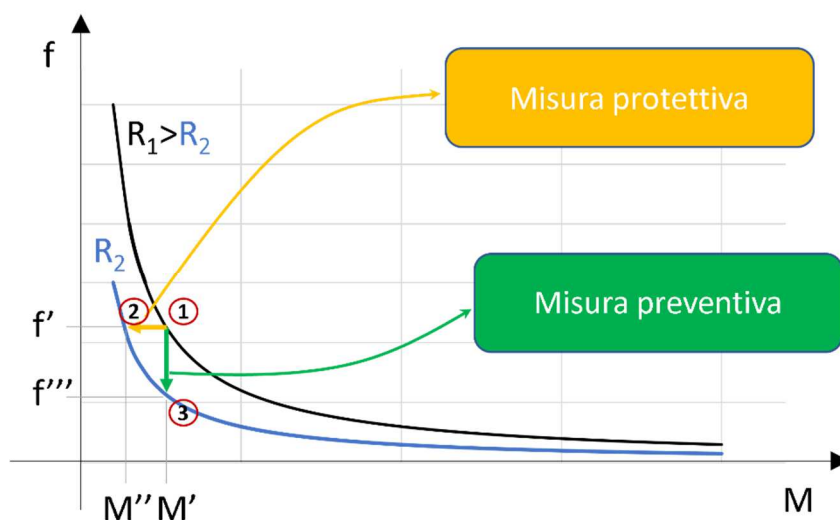


Figura 1.2 – Tra le misure di riduzione del rischio, le misure preventive consentono di agire riducendo la probabilità di accadimento, mentre le misure protettive si attuano attraverso la riduzione della magnitudo.

1.2.3 Il concetto di grande rischio

L'analisi del rischio si è sviluppata parallelamente alla crescita di stabilimenti e impianti di grande entità, si è pertanto posto il problema di stabilire un determinato valore di rischio R , oltre il quale il rischio sia da ritenersi “grande”, ovvero per $R > R^*$, come illustrato in Figura 1.3.

A tale proposito, in riferimento ai grandi rischi, si presuppone per definizione il manifestarsi di danni di severa entità; pertanto, si definisce un rischio connesso a un incidente “grande”, quando il danno a esso associato supera un certo valore di soglia M^* .

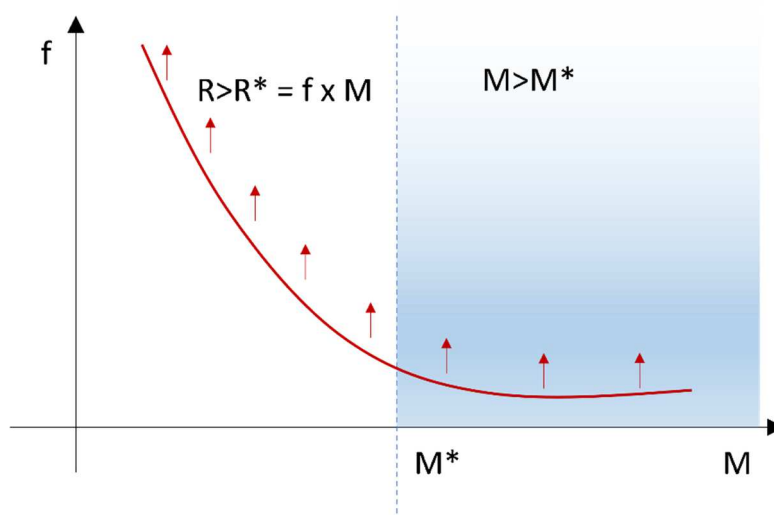


Figura 1.3 – Definizione di grandi rischi.

1.3 Il quadro normativo

A seguito del verificarsi dei primi grandi disastri industriali, con coinvolgimento di un elevato numero di persone e di vaste aree geografiche (Tabella 1.1) la allora Comunità Economica Europea si adoperò per dotarsi di strumenti normativi atti a regolamentare gli stabilimenti a “grande rischio”, soprattutto dal punto di vista della prevenzione dei cosiddetti incidenti rilevanti.

Tabella 1.1 – Alcuni tra i più importanti incidenti rilevanti nella storia dell’industria chimica, occorsi a cavallo tra gli anni Sessanta e Settanta.

Flixborough (UK) 1974	Rilascio di cicloesano ed esplosione: 28 morti e 36 feriti gravi
Seveso (IT) 1976	Nube tossica di diossina TCDD, 700 persone evacuate
Bhopal (IN) 1984	Rilascio tossico di isocianato di metile: 2.259 morti, danni a 558.125 persone

1.3.1 Le direttive Seveso e la definizione di incidente rilevante

Gli stabilimenti industriali dove vengono prodotte, stoccate o manipolate sostanze chimiche rappresentano un potenziale pericolo non solo per i lavoratori, ma anche per la popolazione e per le varie matrici ambientali esterne agli stabilimenti (aria, acqua, suolo ...). Facendo un passo avanti, il D.Lgs. 105/2015, decreto di recepimento in Italia della direttiva 2012/18/UE, fornisce la seguente definizione di incidente rilevante: *“un evento quale un’emissione, un incendio o un’esplosione di grande entità, dovuto a sviluppi incontrollati che si verifichino durante l’attività di uno stabilimento soggetto al presente decreto e che dia luogo a un pericolo grave, immediato o differito, per la salute umana o l’ambiente, all’interno o all’esterno dello stabilimento, e in cui intervengano una o più sostanze pericolose”*.

In relazione al rischio di incidenti rilevanti, l’Unione Europea ha emanato una serie di direttive introducendo gli strumenti dell’analisi del rischio con lo scopo primario di favorire la prevenzione nella gestione degli impianti industriali. La direttiva europea 82/501/CEE, nota anche come direttiva Seveso I, recepita in Italia col DPR 175/88, prende il nome dal disastro di Seveso verificatosi il 10 luglio del 1976 quando, a seguito di un’esplosione all’interno di un reattore chimico dello stabilimento della ICMESA, si verificò il rilascio in atmosfera di una nube tossica contenente 10-12 chilogrammi di diossina. L’incidente ebbe un grande impatto sull’opinione pubblica in quanto comportò l’interessamento di 158 lavoratori dello stabilimento, 37.000 abitanti della zona, gli animali e il suolo in una vasta area della Brianza. Alla direttiva Seveso I seguirono le successive direttive Seveso II 96/82/CE e Seveso II bis 2003/105/CE, fino alla direttiva 2012/18/UE, nota come Seveso

III, già citata per quanto riguarda la definizione di incidente rilevante. Di seguito vengono elencati gli aspetti di maggior rilievo introdotti dalle varie direttive:

1. 82/501/CEE (Seveso I): redazione del Rapporto di Sicurezza (RDS), predisposizione di piano di emergenza esterna allo stabilimento, notifica alle autorità;
2. 96/82/CE + 2003/105/CE (Seveso II): obbligo del gestore dell'attività a rischio incidente rilevante di predisporre e adottare una politica di Prevenzione Incidenti Rilevanti (PIR) e attuare un Sistema di Gestione della Sicurezza (SGS) dotato di misure preventive e di mitigazione delle conseguenze di incidenti rilevanti;
3. 2012/18/UE (Seveso III): obbligo della classificazione di pericolosità delle sostanze e miscele secondo il regolamento CLP, obbligo di includere tra i possibili scenari incidentali quelli derivanti da eventi naturali quali terremoti o inondazioni, redazione di un piano periodico di ispezioni ordinarie a carico del gestore e straordinarie, a carico delle autorità di controllo.

Nel panorama della sicurezza industriale e della sua evoluzione, l'importanza di tali direttive esula dal campo di applicazione diretta relativo ai siti industriali a rischio incidente rilevante. Gli effetti delle direttive Seveso si ripercuotono anche in contesti industriali meno complessi, in quanto le direttive hanno favorito la diffusione di metodi di analisi del rischio sia in fase di progettazione che in ambito autorizzativo, applicabili in modo specifico ad apparecchiature e impianti, o relativamente ad attività e procedure, tenendo conto di aspetti tecnologici, organizzativi e/o legati al comportamento umano.

1.3.2 La valutazione del rischio nel testo unico per la salute e sicurezza nei luoghi di lavoro D.Lgs 81/2008 e s.m.i.

Al livello di quadro normativo nazionale, l'art. 17 del Testo Unico per la salute e Sicurezza nei Luoghi di Lavoro (D.Lgs 81/2008) stabilisce che il datore di lavoro non possa delegare l'attività di *“valutazione di tutti i rischi con la conseguente elaborazione del documento previsto dall'articolo 28”*. L'art. 28 definisce l'oggetto della valutazione dei rischi, concernente la *“scelta delle attrezzature di lavoro e delle sostanze o dei preparati chimici impiegati, nonché la sistemazione dei luoghi di lavoro, deve riguardare tutti i rischi per la sicurezza e la salute dei lavoratori [...]”*. Nella valutazione dei rischi il datore di lavoro si avvale del responsabile del servizio di prevenzione e protezione, del medico competente e del rappresentante dei lavoratori per la sicurezza, figure definite dal D.Lgs 81/2008. A completamento di tale processo valutativo, il datore redige e sottoscrive con data certa il documento di valutazione dei rischi (DVR), che, ai sensi del testo unico, deve contenere *“una relazione sulla valutazione di tutti i rischi per la sicurezza e la salute durante un'attività lavorativa, nella quale siano specificati i criteri adottati per la valutazione stessa [...]”*. Tale valutazione costituisce pertanto uno *“strumento operativo di pianificazione degli interventi aziendali e di prevenzione”*.

1.3.3 Le direttive ATEX

Scopo della presente tesi è quello di effettuare una valutazione del rischio in un impianto di distribuzione di gas naturale liquefatto. Tale sostanza, come verrà affrontato specificamente nei capitoli successivi, presenta la caratteristica di gas infiammabile con possibilità di formare atmosfere esplosive, dove per atmosfera esplosiva viene riportata la definizione di cui al Titolo XI del D.Lgs 81/2008: *“una miscela con l’aria, a condizioni atmosferiche, di sostanze infiammabili allo stato di gas, vapori, nebbie o polveri in cui, dopo accensione, la combustione si propaga nell’insieme della miscela incombusta.”* A tale proposito, l’excursus normativo sulla valutazione del rischio prosegue affrontando nello specifico il rischio connesso alla formazione di atmosfere potenzialmente esplosive, per il quale l’Unione Europea ha emanato due direttive comunitarie note come direttive “ATEX”.

Direttiva 2014/34/UE

La direttiva 2014/34/UE (nuova versione della 94/9/CE), recepita al livello nazionale col D.Lgs 85/2016 e relativa alle disposizioni in materia di apparecchi e sistemi di protezione utilizzati in atmosfere potenzialmente esplosive, ha tra gli obiettivi quello della libera circolazione nel territorio dell’UE dei prodotti che ricadono nel campo di applicazione della direttiva, che prevede requisiti e procedure per stabilire le conformità armonizzate.

La direttiva si applica a:

- apparecchi e sistemi di protezione destinati a essere utilizzati in atmosfere potenzialmente esplosive;
- dispositivi di sicurezza, di controllo e di regolazione destinati a essere utilizzati al di fuori di atmosfere potenzialmente esplosive ma necessari o utili per il funzionamento sicuro degli apparecchi e sistemi di protezione, rispetto ai rischi di esplosione;
- componenti destinati ad essere inseriti negli apparecchi e sistemi di protezione.

Mentre rimangono esclusi dal campo di applicazione della 2014/34/UE:

- Apparecchiature mediche;
- Apparecchi e sistemi di protezione, quando il pericolo di esplosione è dovuto esclusivamente alla presenza di materie esplosive o di materie chimiche instabili;
- Apparecchi destinati a impieghi in ambienti domestici e non commerciali, nei quali un’atmosfera potenzialmente esplosiva può essere provocata solo raramente e unicamente in conseguenza di una fuga accidentale di gas;
- Attrezzature di protezione individuale;
- Navi marittime e unità mobili offshore, nonché le attrezzature utilizzate a bordo di dette navi o unità;
- Mezzi di trasporto, vale a dire veicoli e loro rimorchi destinati unicamente al trasporto di persone per via aerea oppure su reti stradali, ferroviarie o di navigazione e mezzi di trasporto,

nella misura in cui sono concepiti per trasportare merci per via aerea o su reti pubbliche stradali o ferroviarie o di navigazione I veicoli destinati a essere utilizzati in atmosfera potenzialmente esplosiva, non sono esclusi dall'ambito di applicazione della presente direttiva;

- Armi, munizioni e materiale bellico.

Direttiva 99/92/CE

La Direttiva 99/92/CE riporta invece le prescrizioni minime per la sicurezza dei lavoratori esposti al rischio di atmosfere esplosive, i criteri per effettuare l'analisi dei rischi relativi alle atmosfere esplosive (classificazione delle zone e documento contro le esplosioni), nonché i criteri per la scelta delle apparecchiature sulla base dell'analisi effettuata. Al livello nazionale la Direttiva 99/92/CE è recepita al Titolo XI del D.Lgs 81/2008, descritto nel prossimo paragrafo.

1.3.4 La protezione da atmosfere esplosive nel D.Lgs 81/2008

Capo I – Disposizioni generali

Art. 287 - Campo di applicazione

Art. 288 – Definizioni

Capo II – Obblighi del datore di lavoro

Art. 289 - Prevenzione e protezione contro le esplosioni

Art. 290 - Valutazione dei rischi di esplosione

Art. 291 - Obblighi generali

Art. 292 – Coordinamento

Art. 293 - Aree in cui possono formarsi atmosfere esplosive

Art. 294 - Documento sulla protezione contro le esplosioni

Art. 294-bis - Informazione e formazione dei lavoratori

Art. 295 - Termini per l'adeguamento

Art. 296 - Verifiche

Capo III – Sanzioni

Art. 297 - Sanzioni a carico dei datori di lavoro e dei dirigenti

Definizione

Il Titolo XI del Testo Unico ha lo scopo di prescrivere le misure per la tutela della sicurezza e della salute dei lavoratori che possono essere esposti al rischio di atmosfere esplosive. L'art. 288 definisce atmosfera esplosiva “*una miscela con l'aria, a condizioni atmosferiche, di sostanze infiammabili allo stato di gas, vapori, nebbie o polveri in cui, dopo accensione, la combustione si propaga nell'insieme della miscela incombusta.*” Per condizioni atmosferiche il decreto fa riferimento a condizioni in cui la concentrazione di ossigeno nell'aria è approssimativamente del 21 per cento, con scostamenti di pressione e temperatura dai livelli di riferimento (pressione pari a 101325 Pa e temperatura pari a 293

K) che non determinino effetti non trascurabili sulle proprietà esplosive delle sostanze infiammabili o combustibili. Le prescrizioni del Titolo XI si applicano anche nei lavori in sotterraneo ove è presente un'area con atmosfere esplosive o dove è possibile che tale area si possa formare.

Misure preventive e protettive

Quali obblighi del datore di lavoro, l'art. 289 prevede l'adozione di misure di carattere preventivo e protettivo per cui, sulla base delle risultanze della valutazione dei rischi, il DDL adotta le misure tecniche e organizzative adeguate alla natura dell'attività, prevenendo la formazione di atmosfere esplosive. Quando la natura dell'attività non consente di prevenire la formazione di atmosfere esplosive il datore di lavoro ha in primo luogo l'obbligo di evitare l'accensione di atmosfere esplosive, oltre a adottare misure protettive con lo scopo di *“attenuare gli effetti pregiudizievoli di un'esplosione in modo da garantire la salute e sicurezza dei lavoratori.”*

Valutazione dei rischi di esplosione

Nell'art. 290 viene fatto riferimento agli elementi minimi dei quali il datore di lavoro deve tener conto in sede di valutazione dei rischi relativi al pericolo esplosione, ovvero durata e probabilità della presenza di atmosfere esplosive, probabilità di innesco, caratteristiche di impianti, sostanze, processi e relative interazioni, entità degli effetti prevedibili.

Ripartizione delle aree in cui possono formarsi atmosfere esplosive

La classificazione in zone delle aree in cui possono formarsi atmosfere esplosive, secondo l'art. 293, è demandata all'Allegato XLIX. Tale classificazione in zone è effettuata in base alla frequenza e alla durata della presenza di atmosfere esplosive dovute alla presenza di gas, vapori o nebbie infiammabili, o di nubi di polveri combustibili.

➤ ZONA 0

Area in cui è presente in permanenza o per lunghi periodi o frequentemente un'atmosfera esplosiva consistente in una miscela di aria e di sostanze infiammabili sotto forma di gas, vapore o nebbia.

➤ ZONA 1

Area in cui la formazione di un'atmosfera esplosiva, consistente in una miscela di aria e di sostanze infiammabili sotto forma di gas, vapori o nebbia è probabile che avvenga occasionalmente durante le normali attività.

➤ ZONA 2

Aree in cui durante le normali attività non è probabile la formazione di un'atmosfera esplosiva consistente in una miscela di aria e di sostanze infiammabili sotto forma di gas, vapore o nebbia o, qualora si verifichi, si unicamente di breve durata.

➤ ZONA 20

Area in cui è presente in permanenza o per lunghi periodi o frequentemente un'atmosfera esplosiva sotto forma di nube di polvere combustibile nell'aria.

➤ ZONA 21

Area in cui la formazione di un'atmosfera esplosiva sotto forma di nube o di polvere combustibile nell'aria, è probabile che avvenga occasionalmente durante le normali attività.

➤ ZONA 22

Area in cui durante le normali attività non è probabile la formazione di un'atmosfera esplosiva sotto forma di nube di polvere combustibile o, qualora si verifichi, sia unicamente di breve durata.

Per la classificazione delle aree o dei luoghi il TU consente di fare riferimento alle norme tecniche armonizzate tra cui: EN 60079-14 (CEI 31-.33) “Costruzioni elettriche per atmosfere esplosive per la presenza di gas - Parte 14: Impianti elettrici nei luoghi con pericolo di esplosione per la presenza di gas (diversi dalle miniere)”; EN 61241-14 “Costruzioni elettriche destinate ad essere utilizzate in presenza di polveri combustibili. Parte 14: Scelta ed installazione”; EN 60079-17 “Costruzioni elettriche per atmosfere esplosive per la presenza di gas. Parte 17: Verifica e manutenzione degli impianti elettrici nei luoghi con pericolo di esplosione per la presenza di gas (diversi dalle miniere)”; EN 61241-17 “Costruzioni elettriche destinate ad essere utilizzate in presenza di polveri combustibili. Parte 17: Verifica e manutenzione degli impianti elettrici nei luoghi con pericolo di esplosione (diversi dalle miniere)”; EN 60079-19 “Atmosfere esplosive. Parte 17: Riparazioni, revisione e ripristino delle apparecchiature.

Prescrizioni risultanti dalla classificazione

Ancora secondo l'art. 293, a seguito della classificazione in zone, viene fatto riferimento all'Allegato L che prevede le prescrizioni minime da adottare per il miglioramento della sicurezza e della salute dei lavoratori che possono essere esposti al rischio di atmosfere esplosive, oltre ai criteri per la scelta degli apparecchi e dei sistemi di protezione. Le prescrizioni minime riguardano sia provvedimenti organizzativi (formazione professionale dei lavoratori, istruzioni scritte), sia misure di carattere protettivo (aspetti impiantistici, abbigliamento che impedisca la formazione di scariche elettrostatiche, attrezzature).

Infine, l'art. 293 prevede, se necessario, la segnalazione nei punti di accesso alle aree dove è possibile la formazione di atmosfere esplosive pericolose, mediante l'apposizione dell'apposito segnale “EX” riportante l'indicazione “pericolo di esplosione” (Figura 1.4).



Figura 1.4 – Segnale di avvertimento per indicare le aree in cui possono formarsi atmosfere esplosive.

Documento sulla protezione contro le esplosioni

L'art. 294 prevede che il datore, assolvendo all'obbligo di effettuare la valutazione del rischio esplosione, debba provvedere *“a elaborare e tenere aggiornato”* un documento denominato *“documento sulla protezione contro le esplosioni”*. Tale documento ha la funzione di indicare che i rischi di esplosione sono stati individuati e valutati, che saranno prese misure adeguate a raggiungere gli obiettivi per la salute e sicurezza dei lavoratori. Il documento sulla protezione contro le esplosioni deve inoltre contenere la classificazione in zone di cui all'allegato XLIX con indicati i luoghi nei quali vengono applicate le prescrizioni minime, e che i luoghi, le attrezzature e gli impianti, compresi i dispositivi di allarme, saranno *“concepiti, impiegati e mantenuti in efficienza tenendo nel debito conto la sicurezza”*. Infine, il documento dovrà indicare che, ai sensi del titolo III, sono stati adottati gli accorgimenti per l'impiego in sicurezza delle attrezzature da lavoro.

Informazione e formazione dei lavoratori

L'art. 294-bis affronta il tema dell'informazione e formazione dei lavoratori esposti al rischio di esplosione affinché vengano informati e formati sulla base delle risultanze della valutazione dei rischi riguardo alle misure adottate, alla classificazione delle zone, alle modalità operative applicabili per minimizzare i rischi, ai rischi connessi alle caratteristiche degli impianti e delle sostanze presenti, al significato della segnaletica di sicurezza e degli allarmi ottico/acustici, alla presenza di altri eventuali rischi nonché al corretto uso dei dispositivi di protezione individuale inerenti all'ambito del rischio esplosione.

Capitolo 2

Metodologie di valutazione del rischio

2.1 L'analisi del rischio

Dopo aver definito il concetto di rischio vengono introdotti quelli che sono i metodi qualitativi e quantitativi per analizzare e effettuare una valutazione del rischio. Indipendentemente dalle dimensioni del contesto analizzato, la procedura di analisi del rischio è composta di fasi fondamentali secondo lo schema logico iterativo rappresentato dal seguente diagramma di flusso di figura 2.1. Tale schema logico è applicabile per la valutazione del rischio relativo a procedure, macchinari, siti industriali, al livello operativo sono disponibili tecniche specifiche per sviluppare le singole fasi di un'analisi.

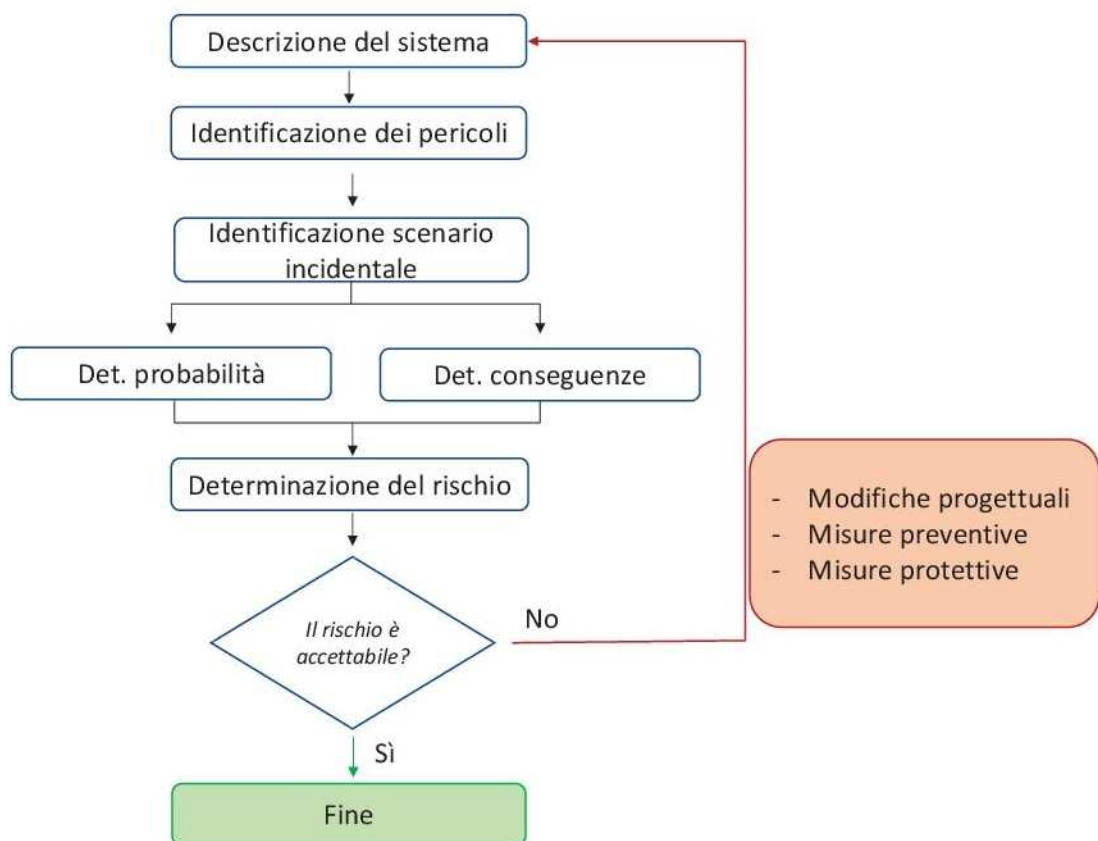


Figura 2.1 – La procedura di analisi del rischio

Descrizione del sistema

La descrizione del sistema è la fase preliminare di un'analisi del rischio nella quale vengono gettate le basi per lo studio e in cui ne vengono definiti i confini. In questa fase viene operato il censimento degli elementi costituenti il contesto da analizzare, effettuando una raccolta documentale che

comprende tutti i dati in ingresso utili a descrivere il contesto. Nel caso di un contesto industriale la descrizione del sistema comprenderà una descrizione dettagliata del sito, informazioni sulle condizioni meteorologiche locali, distribuzione della popolazione sull'area o zona di impatto, censimento completo degli impianti presenti e degli stoccaggi di materiali, documentazione tecnica dello stabilimento relativa a impianti e apparecchiature, conoscenza della movimentazione delle merci nel contesto, presenza di piani di emergenza interni ed esterni esistenti.

Identificazione dei pericoli e degli scenari incidentali

Alla fase di descrizione del sistema segue quella di identificazione dei pericoli presenti per giungere all'individuazione di un'ipotesi incidentale e dell'evento incidentale da analizzare, definito come "*top event*". La fase di identificazione viene effettuata sulla base degli elementi costituenti il contesto (macchinari, reagenti, prodotti) e può essere sviluppata con vari metodi quali:

- Analisi incidentale storica;
- Liste di controllo (*check list*);
- Analisi di operabilità (HAZOP – *Hazard and Operability Analysis*);
- Analisi guasti/effetti (FMEA -*Failure Mode and Effect Analysis*);
- Analisi "what if";
- Metodo dell'albero degli eventi o delle decisioni (*event/decision tree analysis*);
- Metodo dell'analisi delle cause/conseguenze (*cause-consequences analysis*).

Determinazione del rischio

Una volta identificato un *top event*, la determinazione del rischio si sviluppa nelle fasi di determinazione delle frequenze di accadimento (f) e dell'entità delle conseguenze (magnitudo M). La combinazione di frequenza e magnitudo consente di quantificare il rischio secondo il prodotto $R = f \times m$. La valutazione delle frequenze è una valutazione quantitativa che può essere effettuata sulla base di dati statistici ricavabili da banche dati o mediante lo sviluppo di modelli probabilistici, nonché mediante tecniche di settore quali la tecnica dell'albero dei guasti (FTA – *Fault Tree Analysis*). La valutazione delle conseguenze è riferita a tre tipologie di fenomeni che possono avere origine da un *top event*: incendio, esplosione, rilascio e dispersione di sostanze tossiche. Un'analisi delle conseguenze prevede una quantificazione dell'entità di tali fenomeni, dove i parametri fisici di riferimento sono la radiazione termica per l'incendio, la sovrappressione per le esplosioni e la concentrazione di sostanza tossica in riferimento ai rilasci.

Valutazione del rischio

Determinato il rischio relativo al pericolo identificato, l'analista effettuerà una valutazione di accettabilità di tale rischio. In caso di esito negativo della valutazione, si renderanno necessarie misure di mitigazione del rischio che determineranno la variazione delle ipotesi iniziali e l'iterazione

della procedura sopra esposta per andare a ricalcolare e valutare il rischio finché non sarà ritenuto accettabile.

2.2 Metodologia HAZOP

La metodologia HAZOP, abbreviazione di *Hazard and Operability Study*, è una tecnica utilizzata nella fase preliminare di identificazione dei pericoli al fine di formulare le ipotesi incidentali che verranno sviluppate nelle fasi successive di un'analisi del rischio. È un metodo sistematico che consente di identificare le possibili sequenze di guasti in grado di portare a un evento incidentale (*top event*). Preliminarmente è necessario reperire tutta la documentazione di impianto disponibile per effettuare uno studio dell'impianto che consenta di comprenderne la logica complessiva e il funzionamento. Il sistema o impianto in esame viene quindi suddiviso in nodi dotati di ingresso e uscita in modo da analizzare sistematicamente tutte le possibili variazioni del sistema rispetto alle intenzioni di progetto che potrebbero dare origine ad anomalie. Per ogni nodo dell'impianto l'analista redige una tabella dove alle variabili/parametri in gioco (temperatura, pressione, portata...) vengono associate delle parole guida (Figura 2.2) che costituiscono deviazioni dalle intenzioni di progetto (più, meno, diverso...).

Guide words	Meaning	Comments
NO, NOT, NONE	The complete negation of the intention	No part of the design intention is achieved, but nothing else happens.
MORE, HIGHER, GREATER	Quantitative increase	Applies to quantities such as flow rate and temperature and to activities such as heating and reaction.
LESS, LOWER	Quantitative decrease	Applies to quantities such as flow rate and temperature and to activities such as heating and reaction.
AS WELL AS	Qualitative increase	All the design and operating intentions are achieved along with some additional activity, such as contamination of process streams.
PART OF	Qualitative decrease	Only some of the design intentions are achieved, some are not.
REVERSE	The logical opposite of	Most applicable to activities such as flow or chemical reaction. Also applicable to substances, for example, poison instead of antidote.
OTHER THAN	Complete substitution	No part of the original intention is achieved – the original intention is replaced by something else.
SOONER THAN	Too early or in the wrong order	Applies to process steps or actions.
LATER THAN	Too late or in the wrong order	Applies to process steps or actions.
WHERE ELSE	In additional locations	Applies to process locations, or locations in operation.

Figura 2.2 – Tipiche parole guida in un'analisi HAZOP

L'associazione di deviazioni alle intenzioni di progetto comporta l'identificazione di conseguenze e di punti critici dell'impianto e quindi di possibili incidenti che verranno poi sviluppati e analizzati con altre tecniche. La metodologia HAZOP è una tecnica tipicamente utilizzata nel campo dell'industria di processo, dove presenta utilità sia in fase di progettazione, sia in fase di revisione per l'identificazione di soluzioni migliorative.

2.3 Albero dei guasti (FTA- Fault Tree Analysis)

La tecnica dell'albero dei guasti viene utilizzata nella fase di determinazione del rischio per l'individuazione delle frequenze di accadimento. È un procedimento logico deduttivo nel quale il punto di partenza è costituito dall'evento indesiderato o *top event*. A partire dall'evento finale vengono individuati gli eventi intermedi che hanno causato il *top event*, tali eventi vengono utilizzati per lo sviluppo di un diagramma ad albero. Gli eventi intermedi vengono associati tra loro mediante cancelli logici booleani (*and/or*) in modo da rappresentare le sequenze logiche di guasti che conducono all'evento finale. In appositi database è possibile raccogliere i tassi di guasto relativi ad apparecchiature (sensori, valvole, pompe, scambiatori, tubazioni...) e tipologie di rottura (piccola, media o grande entità). Una volta rappresentate le sequenze incidentali e reperiti i tassi di guasto delle apparecchiature, è possibile determinare le frequenze di accadimento del *top event* e degli eventi intermedi mediante le seguenti formule di algebra booleana:

- Probabilità di accadimento di un evento dato dall'unione di due eventi mutuamente esclusivi (portale *or*) A e B

$$P(A \text{ or } B) = P(A) + P(B) \quad (2.1)$$

- Probabilità di intersezione di eventi stocasticamente indipendenti (portale *and*) A e B

$$P(A \text{ and } B) = P(A) \cdot P(B) \quad (2.2)$$

- Probabilità di unione di due eventi non mutuamente esclusivi A e B

$$P(A \text{ or } B) = P(A) + P(B) - P(A \text{ and } B) \quad (2.3)$$

- Probabilità condizionale, che esprime la probabilità che accada un evento A, data la conoscenza dell'avvenuto accadimento dell'evento B. La relazione (2.5) è nota anche come teorema di Bayes.

$$P(A|B) = P(A \text{ and } B) / P(B) \quad (2.4)$$

$$P(A|B) = P(A) \cdot P(B|A) / P(B) \quad (2.5)$$

Nella determinazione delle frequenze di accadimento degli eventi entrano in gioco le seguenti grandezze in termini di probabilità:

- Tasso di guasto μ : è definito come probabilità condizionale di accadimento di un guasto di un componente in un certo intervallo di tempo $[t; t+dt]$;
- Affidabilità: è definita come la probabilità che un componente o un sistema sia funzionante in un certo intervallo di tempo tra 0 e t ;
- Disponibilità: è definita come la probabilità che un sistema o componente funzioni all'istante di tempo t .

In letteratura tecnica è possibile reperire i tassi di guasto μ relativi ai componenti di impianti industriali, dai quali è possibile determinare la probabilità di guasto di un componente secondo l'equazione(2.6):

$$P(t) = 1 - R(t) = 1 - e^{-\mu t} \quad (2.6)$$

Al tasso di guasto è correlata un'ulteriore grandezza che rappresenta l'intervallo di tempo compreso tra due guasti successivi di un componente, definito MTBF (*mean time between failures*):

$$MTBF = 1 / \mu_{tot} \quad (2.7)$$

2.4 Albero degli eventi (ETA - Event Tree Analysis)

La tecnica dell'albero degli eventi segue un diagramma logico opposto a quello dell'albero dei guasti, è una tecnica di tipo deduttivo che a partire da un certo evento iniziatore quale il rilascio di una certa sostanza, consente di individuare gli scenari incidentali finali che possono evolversi a seguito dell'evento iniziatore. Preliminarmente è necessario individuare i sistemi, fenomeni e condizioni che possono sviluppare l'evolversi degli eventi a partire da quello iniziatore. Ognuno di questi fenomeni consentirà di sviluppare un nodo dell'albero degli eventi, dal quale si diramano generalmente due percorsi logici sì/no corrispondenti al verificarsi o meno dei fenomeni che possono influenzare l'evolversi dell'evento iniziatore. Di volta in volta a ciascuna diramazione è associata una certa probabilità di accadimento che può essere a sua volta calcolata col metodo dell'albero dei guasti in quando le due tecniche sono spesso utilizzate in maniera complementare.

L'obiettivo principale di questa tecnica è quello di definire le sequenze logiche di eventi originati da un fenomeno incidentale andando a determinare la probabilità di accadimento dei diversi scenari possibili, dove le conseguenze del fenomeno incidentale possono essere dirette (incendi o esplosioni), oppure indirette (effetto domino a colpire altri bersagli). Nel caso di un rilascio di una sostanza infiammabile i nodi dell'albero degli eventi sono generalmente costituiti da fenomeni quali innesco immediato o ritardato, effetti causati dalle condizioni meteorologiche quali ad esempio il vento o dall'intervento o meno di sistemi con funzioni di protezione o mitigazione.

Questa tecnica è applicabile nell'analisi del rischio sia nelle fasi progettuali o di revisione, sia nell'analisi post incidentale per la ricerca delle cause di un evento incidentale.

Capitolo 3

Caso studio: Impianto stradale di distribuzione di gas naturale liquefatto (GNL) per autotrazione

3.1 Il gas naturale liquefatto

Il Gas naturale (GN) è un fluido combustibile allo stato gassoso, incolore a pressione atmosferica, inodore, costituito da una miscela di idrocarburi, principalmente metano, e che può contenere anche etano, propano ed altri idrocarburi. Generalmente può anche includere piccole quantità di gas inerti come l'azoto e l'anidride carbonica e tracce di altri costituenti.

Il gas naturale liquefatto (GNL) è un fluido criogenico incolore e inodore allo stato liquido a pressione atmosferica, composto prevalentemente da metano, che può contenere quantità minori di etano, propano, butano, azoto o altri componenti generalmente presenti nel gas naturale, ad eccezione dell'anidride carbonica. Il gas di evaporazione GNL (*boil-off gas* GNL – BOG-GNL) è un gas risultante dall'evaporazione naturale del GNL in prossimità del suo stato di equilibrio. Con l'acronimo GNC si identifica invece il gas naturale compresso, ovvero gas naturale in forma gassosa a pressione maggiore di quella atmosferica. Il gas naturale viene utilizzato come carburante per autotrazione sia nella forma liquefatta (GNL) che gassosa (GNC). Uno dei vantaggi principali derivati dall'utilizzo del GNL è che per lo stesso quantitativo di gas, il volume occupato dal GNL è 600 volte inferiore al volume in forma gassosa.



Il GNL è classificato secondo la normativa (CE) n. 1272/2008 [EU-GHS/CLP] come gas altamente infiammabile (H220) e come gas refrigerato, che può provocare ustioni e lesioni criogeniche (H281). È un gas estremamente infiammabile i cui vapori possono formare una miscela infiammabile ed esplosiva con l'aria. Concentrazioni di vapori possono inoltre provocare emicrania, nausea e vertigini.

Secondo il Regolamento CLP, il GNL presenta l'etichettatura riferita al pericolo di incendio della figura 3.1.

Figura 3.1 – Etichettatura pericolo incendio.

I consigli di prudenza secondo il Regolamento CLP sono:

P210: tenere lontano da fonti di calore, superfici calde, scintille, fiamme libere o altre fonti di accensione. Non fumare.

P243: prendere precauzioni contro le scariche elettrostatiche.

P273: non disperdere nell'ambiente.

P282: utilizzare indumenti protettivi (schermo facciale, guanti termici, protezione per gli occhi)

P315: consultare immediatamente un medico.

P336: sgelare le parti congelate utilizzando acqua tiepida. Non sfregare la parte interessata.

P377: in caso di incendio dovuto a perdita di gas, non estinguere a meno che non sia possibile bloccare la perdita senza pericolo.

P403: conservare in un luogo ben ventilato.

Altri pericoli identificati, non rilevanti per la classificazione, sono costituiti dal fatto che il gas naturale liquefatto può accumulare una carica elettrostatica per scorrimento o agitazione e può essere acceso da una scarica elettrostatica. I contenitori per lo stoccaggio e le tubazioni di distribuzione possono diventare tanto fredde da presentare il pericolo di ustioni da freddo.

Quali mezzi di estinzione in caso di incendio, per incendi di piccole dimensioni sono indicate polvere secca o schiuma, mentre per incendi di grandi dimensioni schiuma o acqua nebulizzata, oltre a gas estinguenti. Risulta altresì pericoloso utilizzare getti d'acqua sul prodotto che brucia.

Proprietà fisiche e chimiche del GNL:

Punto di fusione:	ca -182 °C (variabile in base alla composizione)
Punto di ebollizione:	ca -165 ÷ -161 °C
Punto di infiammabilità:	≤ -187 °C
Temperatura di autoaccensione:	ca 537 °C (variabile in base alla composizione)
Densità relativa di vapore a 20 °C:	< 1 (aria secca)
Densità:	430 ÷ 520 kg/m ³
Limiti di esplosività	5 ÷ 15 % vol

Misure di sicurezza in caso di rilascio accidentale

In generale, se le condizioni di sicurezza lo consentono, arrestare o contenere la perdita alla fonte. Evitare il contatto diretto con il materiale rilasciato. Rimanere sopravento. In caso di sversamenti di grande entità, avvertire i residenti delle zone sottovento. Eliminare tutte le fonti di accensione se le condizioni di sicurezza lo consentono (es.: elettricità, scintille, fuochi, fiaccole). Utilizzare esclusivamente attrezzi anti-scintilla. I vapori freddi di GNL sono più pesanti dell'aria fino a circa -110 °C, poi diventano progressivamente più leggeri. Prestare particolare attenzione all'accumulo nei

pozzi e negli spazi confinati. È possibile utilizzare degli appositi sensori per individuare gas o vapori infiammabili.

Raccomandazioni per gli interventi di estinzione incendi di GNL

Qualora le condizioni di sicurezza lo consentano, arrestare o contenere il rilascio alla fonte, evitando tentativi di estinzione dell'incendio fintanto che la perdita non è stata interrotta o si è certi dell'immediata intercettazione.

In caso di incendio utilizzare getti d'acqua per raffreddare le superfici e i contenitori esposti alle fiamme o al calore. Se l'incendio non può essere controllato, evacuare l'area.

Informazioni sul trasporto

Il GNL viene trasportato su terra in apposite autocisterne (Figura 3.2). Il trasporto è soggetto a prescrizioni secondo il regolamento ADR, di cui viene illustrato in figura il pannello arancione relativo al GNL (Figura 3.3), indicante in basso il numero ONU relativo al materiale pericoloso trasportato (1972) e, nella parte superiore, il numero di *Kemler* che identifica il tipo di pericolo. Nel caso del GNL il numero di *Kemler* 223 è riferito alla presenza gas liquefatto refrigerato e infiammabile,



Figura 3.2 – Autocisterna per il trasporto di GNL



Figura 3.3 – Targa ADR per il trasporto di GNL

In relazione al trasporto via mare il GNL è soggetto a prescrizioni secondo i regolamenti IMDG e ADNR, mentre per il trasporto aereo è soggetto al regolamento ICAO e vietato su aerei passeggeri.

3.2 Impianti di distribuzione L-GNC/GNL

Un impianto di distribuzione L-GNC/GNL è un insieme costituito da attrezzature, componenti ed accessori finalizzati alla distribuzione di GNL e di GNC per autotrazione, alimentato da un serbatoio fisso di GNL, installato in una stazione di rifornimento, dalla definizione del DM 30 giugno 2021: “Approvazione della regola tecnica di prevenzione incendi per la progettazione, la realizzazione e l’esercizio di impianti di distribuzione di tipo L-GNL, L-GNC e L-GNC/GNL per autotrazione alimentati da serbatoi fissi di gas naturale liquefatto”.

Prima dell’avvento del L-GNL, gli impianti che erogavano il gas naturale erano progettati e realizzati per la distribuzione in forma gassosa, e sono tuttora gli impianti più diffusi. L’approvvigionamento di prodotto su questi impianti viene realizzato attraverso prelievo di metano dalla rete, che viene poi compresso alla pressione in apposita cabina; oppure, in alternativa, tali impianti vengono riforniti da un apposito carro bombolaio idoneo per il trasporto su strada. Gli impianti misti L-GNC/GNL vengono altresì riforniti di GNL che viene trasportato in apposite autocisterne, e stoccato sugli impianti in serbatoi criogenici che possono essere ad asse orizzontale o verticale. Il prodotto così stoccato viene poi erogato agli utenti in forma liquida (GNL), e per quanto riguarda gli utenti GNC il prodotto subisce delle trasformazioni attraverso il passaggio in appositi vaporizzatori, bombole di accumulo e riduttori di pressione prima di essere erogato in forma gassosa all’utente.

Principali caratteristiche di un impianto e rispettiva destinazione d’uso	GNL	GNC
Componenti principali		
Serbatoio criogenico ad asse orizzontale o verticale	✓	✓
Pompa criogenica di mandata	✓	✓
Pompa criogenica di alta pressione		✓
Vaporizzatore atmosferico ad alta pressione		✓
Pacco bombole di accumulo gas compresso		✓
Linea di erogazione ed erogatore GNC		✓
Linea di erogazione ed erogatore GNL	✓	
Principali utilizzatori		
Mezzi pesanti	✓	
Autobus per il trasporto pubblico, veicoli privati		✓

Tabella 3.1 – Componenti di impianti di GNL e GNC.

3.3 Normativa di riferimento per i distributori stradali

- DM 24 maggio 2002 (Modificato dal DM 28 giugno 2002) “Norme di prevenzione incendi per la progettazione, costruzione ed esercizio degli impianti di distribuzione stradale di gas naturale per autotrazione;

- DM 30 giugno 2021: “Approvazione della regola tecnica di prevenzione incendi per la progettazione, la realizzazione e l’esercizio di impianti di distribuzione di tipo L-GNL, L-GNC e L-GNC/GNL per autotrazione alimentati da serbatoi fissi di gas naturale liquefatto”.

3.4 Elementi costruttivi dell’impianto

La figura 3.4 mostra la planimetria essenziale di un impianto di L-GNC/GNL. Nei seguenti paragrafi verranno descritte le unità di cui è composto l'impianto.

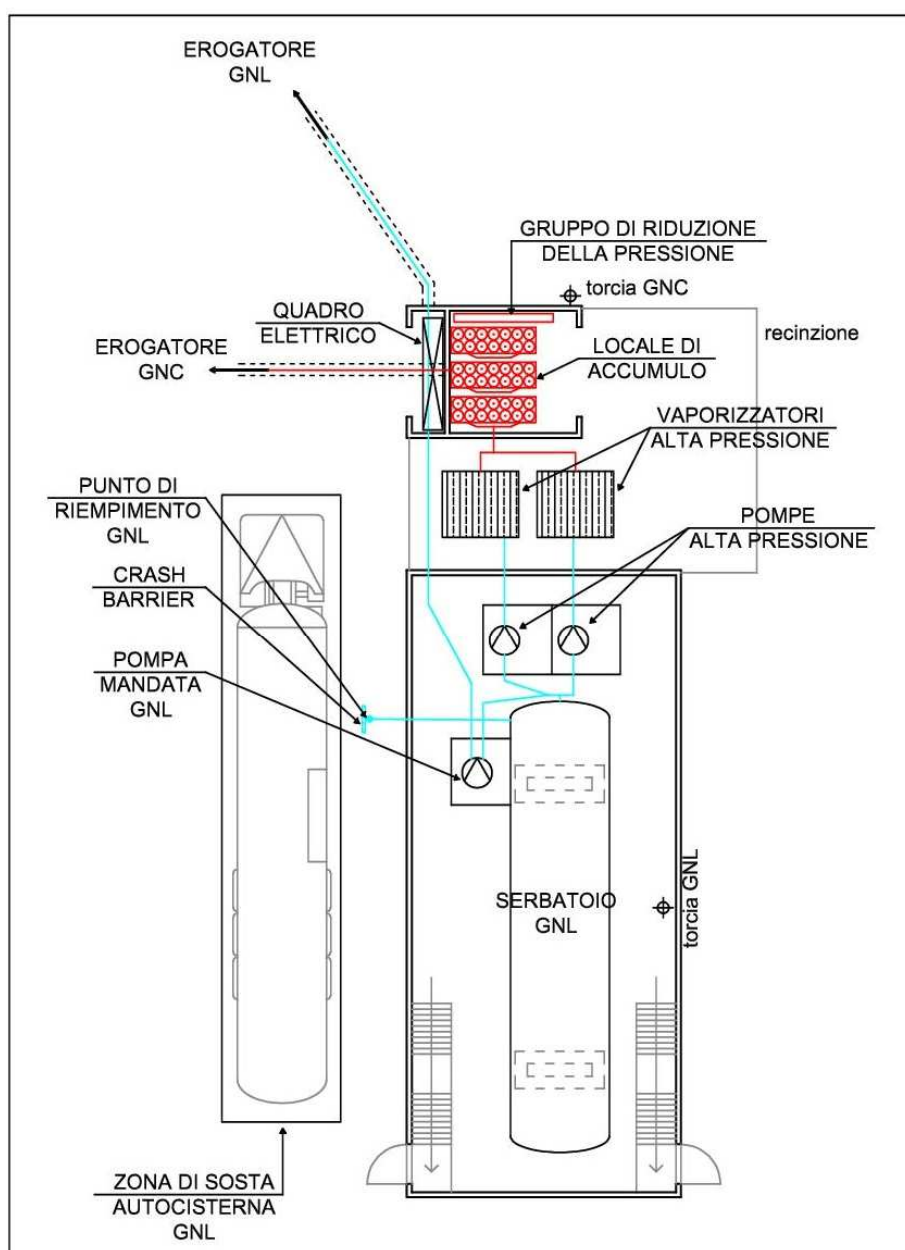


Figura 3.4 – Planimetria impianto di distribuzione stradale per GNL e GNC

3.4.1 Serbatoio criogenico

Nel caso in esame, il metano liquido viene stoccato in un apposito serbatoio criogenico da 60.000 litri, ad asse orizzontale, connesso all'impianto mediante installazioni fisse e saldamente ancorato alla propria platea di fondazione. Il serbatoio è del tipo a doppia parete con intercapedine sottovuoto riempita di perlite per garantire un elevato grado di isolamento termico. La parete interna è realizzata in acciaio Inox AISI 304, mentre quella esterna in acciaio al carbonio S 235 JR. Il massimo prodotto stoccabile nel serbatoio in esame è pari al 95 % della capacità massima, ovvero 55.575 litri con una pressione di 0.3 Mpa (3 bar g), corrispondenti in termini di peso a 24,7 tonnellate (nel rispetto del limite di 50 tonnellate fissato dalla regola tecnica). In condizioni d'esercizio ordinarie, il GNL all'interno del serbatoio ha una pressione di $3 \div 5$ bar g e una temperatura di circa $-160 \div -150^{\circ}\text{C}$. Il serbatoio criogenico, progettato, costruito e collaudato secondo quanto dettato dalla Direttiva PED è idoneo ad una pressione massima di esercizio di 1,8 Mpa (18 bar g) e una temperatura minima di esercizio di -196°C . Il serbatoio è installato fuori terra all'interno di un bacino di contenimento in calcestruzzo, parzialmente al di sotto del livello del suolo circostante, con la generatrice superiore a quota superiore del piano campagna. Il bacino di contenimento è recintato di modo che il serbatoio e le relative apparecchiature risultano accessibili ai soli addetti ai lavori, che possono accedere facilmente attraverso apposite scale. Le linee di collegamento del serbatoio sono dotate di valvole di intercettazione, di cui la prima manuale. Il dispositivo di riempimento per travaso del serbatoio è protetto da una valvola di non ritorno ed equipaggiato con doppia linea, ciascuna dotata di propria valvola di intercettazione, per permettere la ripartizione della carica sia dall'alto (fase gassosa), che dal basso (fase liquida).

Il serbatoio è dotato dei seguenti sistemi di controllo:

- sistema di misura del livello di prodotto stoccato in grado di attivare un preallarme di alto livello al raggiungimento del 95% del livello massimo indicato dal costruttore;
- sistema (indipendente) di blocco automatico del riempimento, che si attiva al raggiungimento del massimo livello indicato dal costruttore;
- sistema di controllo della pressione;
- trasduttore per verifica della pressione a distanza;
- misuratore del grado di vuoto

Sempre in ottemperanza alla regola tecnica, il serbatoio è provvisto delle seguenti apparecchiature ausiliarie:

- manometro collegato alla parte alta del serbatoio;
- valvole di sicurezza;
- valvole di sicurezza di riserva;
- dispositivo di esclusione (valvola a tre vie) dell'esercizio di singole valvole di sicurezza durante le operazioni di manutenzione, tale da assicurare la portata di efflusso prevista dalle norme di sicurezza.

Le selle e i supporti che sostengono il serbatoio sono caratterizzati da una resistenza al fuoco in grado di resistere alle radiazioni termiche da incendio di $12,5 \text{ kW/m}^2$ per non meno di un'ora, tenendo conto del massimo carico strutturale costituito dal serbatoio pieno. L'ancoraggio del serbatoio deve essere tale da assicurare che in caso di allagamento venga evitato il galleggiamento dello stesso.

3.4.2 Pompe criogeniche

All'interno del bacino di contenimento e ad esso saldamente ancorate sono presenti:

- pompa criogenica di mandata del GNL che preleva il liquido e lo invia all'erogatore;
- due pompe criogeniche di alta pressione che prelevano il GNL per inviarlo ai vaporizzatori di alta pressione, che a loro volta convogliano il prodotto nel locale di accumulo collegato attraverso un gruppo di riduzione della pressione agli erogatori di GNC.

Le pompe sono dotate di sistemi di sicurezza intrinseci di controllo della pressione. Tali sistemi, in caso di anomalie dovute a rotture, provocheranno l'arresto delle stesse. Per favorire l'adescamento e al contempo evitare fenomeni di cavitazione, il serbatoio è installato in posizione rialzata rispetto al piano delle pompe. Le pompe risultano inoltre conformi al DPR 459/96 (Direttiva Macchine) garantendo il rispetto dei requisiti di sicurezza previsti, compreso l'obbligo di apposizione di marcatura CE, nonché conformi al D.Lgs 233/03 (Direttiva ATEX).



Figura 3.5 – Pompe criogeniche

Le pompe sono corredate di un sensore per il rilievo delle perdite basato sul rilievo della corretta temperatura dell'uscita albero pompa, nonché di un sensore per rilievo delle condizioni di cavitazione. A valle dello stadio di pompaggio è installata una valvola di sicurezza con scarico convogliato in torcia. Tali sistemi, in caso di anomalie dovute a rotture, provocheranno l'arresto della pompa.

La pompa criogenica di mandata del GNL è installata quanto più vicino possibile al serbatoio in quanto tale requisito è necessario per il mantenimento in “freddo” della pompa a garanzia del suo perfetto funzionamento. La pressione di pompaggio risulta inferiore ai 20 bar g.

Le pompe criogeniche ad alta pressione per il pompaggio del liquido al gruppo di vaporizzazione hanno una pressione massima di esercizio pari a 300 bar g con portata minima di $140 \text{ Nm}^3/\text{h}$ e portata massima $800 \text{ Nm}^3/\text{h}$, corrispondente a 241 l/min.

3.4.3 Vaporizzatori atmosferici di alta pressione

Nell'impianto in sono installati esame due vaporizzatori di alta pressione all'interno del bacino di contenimento e ad esso saldamente ancorati. La funzione di tali apparecchiature è quella di favorire il passaggio del gas naturale allo stato gassoso per alimentare gli erogatori GNC.

Un gruppo di vaporizzazione atmosferico converte il gas dallo stato liquido a gassoso grazie alla forte differenza di temperatura tra il gas naturale liquefatto (-160 °C) e l'atmosfera circostante. Gli elementi di scambio sono costituiti da profili di alluminio estruso avvolti su tubazione in acciaio Inox. I profili in alluminio e la loro disposizione sono dimensionati in modo tale da garantire la migliore efficienza e ridurre la formazione di ghiaccio. L'intera struttura è dimensionata tenendo conto delle sollecitazioni atmosferiche quali l'effetto del vento. Trattandosi di vaporizzatori di tipo atmosferico, essi sono da ritenersi assimilabili alle tubazioni e pertanto risultano esclusi dagli gli elementi pericolosi. Ogni singolo vaporizzatore ha una capacità di 30 litri e una capacità evaporativa di 898 Nm³/h. La pressione di esercizio del gruppo di vaporizzazione è di 300 bar g. La temperatura del metano in fase gassosa in uscita dal gruppo di vaporizzazione alta pressione è compresa in un intervallo di -5 e 0 °C. A valle dei due vaporizzatori atmosferici di alta pressione è installato un sistema di controllo della temperatura collegato a un dispositivo automatico di blocco per proteggere tutti gli elementi successivi (pacco bombole, linea GNC, erogatore GNC). Il gruppo vaporizzazione di alta pressione è inoltre munito di valvola di sicurezza per protezione da sovrappressione, applicata alla fase gassosa onde evitare la fuoriuscita di liquido.

3.4.4 Vaporizzatore atmosferico di rimessa in pressione del serbatoio GNL

Il vaporizzatore atmosferico di rimessa in pressione del serbatoio in GNL è installato all'interno del bacino di contenimento e ad esso solidamente ancorato. La funzione di tale vaporizzatore è quella di permettere il controllo della pressione all'interno serbatoio di GNL. Trattandosi di vaporizzatore di tipo atmosferico è da ritenersi assimilabile alle tubazioni ed è pertanto escluso dagli elementi pericolosi. Nel caso in cui, durante il normale esercizio dell'impianto o durante l'operazione di riempimento il serbatoio di GNL dovesse raggiungere pressioni prossime a quella minima indicata dal costruttore, il vaporizzatore di rimessa in pressione permette di aumentare la pressione interna. La pressione massima di esercizio del vaporizzatore sarà pari a quella del serbatoio criogenico (18 bar g).

3.4.5 Bacino di contenimento e recinzione GNL

Il serbatoio criogenico è inserito all'interno di un bacino di contenimento in cemento armato, di dimensioni interne 18,60 x 7,90 metri, col piano di calpestio a profondità 3,60 metri rispetto al circostante piano campagna. Le pareti di contenimento sono realizzate in modo da superare di 20 centimetri la quota del terreno circostante. Attorno al perimetro del bacino è installata una recinzione

metallica per impedire l'accesso ai non autorizzati, dotata di due differenti ingressi dove sono presenti delle scale metalliche di larghezza 1,20 metri per accedere al piano del serbatoio GNL. La funzione del bacino di contenimento è quella di evitare che eventuali limitate perdite di GNL possano espandersi nell'impianto, al suo interno è inoltre presente un sistema di pompaggio per la rimozione delle acque meteoriche, attivabile manualmente dall'operatore. L'area del bacino di contenimento è potenzialmente interessata dalla presenza di atmosfere esplosive; pertanto, è presente un sistema di rivelazione di gas in grado di interrompere la corrente di tutto l'impianto, compreso quello di pompaggio delle acque meteoriche. La pompa e l'impianto elettrico della stessa rispettano la Direttiva ATEX.

3.4.6 Torcia fredda GNL e torcia GNC

Le torce costituiscono l'elemento finale del sistema di protezione dal rischio di sovrappressioni che è formato, nelle varie parti dell'impianto, da valvole di sicurezza limitatrici della pressione. Esse sono installate a protezione del serbatoio, delle tubazioni criogeniche e di fase gassosa, della pompa criogenica, dello stoccaggio gas smorzamento e infine delle colonnine erogatrici. Le torce fredde sono condotte in acciaio dai quali il gas naturale deve fuoriuscire su spazio a cielo libero, a un'altezza non inferiore a 2,5 dal piano campagna e comunque ad almeno un metro al di sopra di eventuali elementi o apparecchiature dell'impianto situati entro un raggio di 8 metri.

L'impianto in esame è dotato di due distinte torce, una per l'impianto L-GNL e per la porzione L-GNC fino all'elemento pacco bombole, di seguito indicata come "torcia fredda GNL"; e una per la porzione di impianto L-GNC a valle del pacco bombole, di seguito indicata come "torcia GNC".

La torcia fredda GNL è posta in prossimità del serbatoio criogenico di GNL e convoglia tutti gli scarichi in atmosfera ad una quota di circa 4,90 al di sopra del piano del bacino di contenimento, ovvero 1,30 metri al di sopra della generatrice superiore del serbatoio.

La torcia GNC è installata in prossimità del locale pacco bombole e convoglia tutti gli scarichi in atmosfera ad una quota non superiore a 2,5 metri dal piano campagna.

3.4.7 Punto di riempimento del serbatoio criogenico

Il punto di riempimento del serbatoio criogenico di stoccaggio del GNL è unico e posizionato all'esterno del bacino di contenimento, e protetto da urti accidentali da un'apposita *crush barrier*. Il GNL viene trasportato al distributore con apposite autocisterne, che al momento dello scarico vengono collegate al punto di riempimento con un'apposita manichetta flessibile idonea alla movimentazione del prodotto. Il punto di riempimento è dotato di valvola di intercettazione, valvola di non ritorno e valvola di eccesso di flusso, nonché di pinza di messa a terra per l'autobotte. Non sono presenti pompe di travaso installate sull'impianto in quanto la pompa è presente sull'autocisterna GNL. Le autocisterne tra trasporto GNL devono rispettare la normativa ADR di trasporto delle merci

pericolose e le pompe di travaso a dotazione devono essere conformi sia alla Direttiva ATEX che alle norme per la movimentazione di prodotti criogenici come il gas naturale liquefatto. Sia in corrispondenza del punto di riempimento facente parte dell'impianto, sia sulle autocisterne, sono presenti pulsanti di emergenza in grado di provocare lo sgancio elettrico e pneumatico dell'autocisterna, con conseguente arresto della pompa di riempimento e la chiusura delle valvole dell'autocisterna.



Figura 3.6 – Punto di riempimento del serbatoio da autocisterna

Per quanto riguarda i dispositivi di controllo nella sezione di caricamento del serbatoio, sono presenti sensori di pressione e temperatura collegati alla centralina posta nel locale del gestore.

3.4.8 Tubazioni

Le tubazioni sono progettate tenendo conto di tutte le condizioni operative e conformemente alla Direttiva PED per le apparecchiature in pressione. Le tubazioni sono realizzate in acciaio INOX e coibentate, idonee alla movimentazione di prodotto a bassa temperatura. Le tubazioni interrato nel tratto compreso tra il bacino di contenimento e l'erogatore GNL sono inserite in apposito cunicolo in cemento armato idoneo ai piazzali soggetti al traffico veicolare. Al fine di evitare i rischi dovuti a contrazioni e dilatazioni termiche, sono adottati accorgimenti tecnici per garantire la libera dilatazione termica delle tubazioni.

3.4.9 Impianto elettrico L-GNC/GNL

L'impianto L-GNC/GNL è dotato di impianti elettrici, impianti di terra e di protezione dalle scariche atmosferiche realizzati secondo quanto indicato dalla legge 186/1968. Il quadro elettrico di bassa

tensione è ubicato in apposito locale ed è dotato di caratteristica IP 55. L'interruttore generale dell'impianto è posizionato esternamente alle zone classificate come zone con pericolo di esplosione. Nei locali con pericolo di esplosione gli impianti elettrici sono realizzati in conformità alla Direttiva ATEX.

3.4.10 Erogatore GNL

L'erogatore di GNL è di tipo singolo, pertanto dotato di un'unica pistola di erogazione ed è del tipo a misura effettiva di massa di gas [kg] erogata nel veicolo, indipendentemente dai valori di pressione, temperatura e densità. Il rifornimento dei veicoli è effettuato a ciclo chiuso con collegamento di una linea di erogazione di GNL allo stato liquido e collegamento di una linea di ritorno dei gas di evaporazione. Prima della pistola di erogazione al veicolo è inserita una valvola di non ritorno. L'intero apparecchio di erogazione fa capo a un dispositivo di intercettazione posto alla radice dell'apparecchio stesso, in apposito pozzetto ispezionabile.



Figura 3.7 – Erogatore per GNL

3.4.11 Area sosta autocisterna GNL

L'area di sosta dell'autocisterna GNL è disposta in area appositamente realizzata in posizione tale da evitare interferenze col traffico dei veicoli circolanti all'interno dell'area del distributore e tale da consentirne il rapido allontanamento in caso di necessità. La pavimentazione dell'area di sosta è asfaltata con pendenza massima pari all'1% al fine di evitare movimenti incontrollati dell'autocisterna. In prossimità del punto di riempimento è installato un rilevatore fughe di gas atto a rilevare eventuali rilasci accidentali di prodotto e attivare il segnale di emergenza.

3.4.12 Locale di accumulo GNC

L'impianto GNC è dotato di un locale in cemento armato per il contenimento dei recipienti di accumulo per una capacità di 3360 litri alla pressione di 300 bar g. I recipienti di accumulo sono costituiti da un pacco bombole atte a immagazzinare il GNC proveniente dai vaporizzatori atmosferici di alta pressione.

Capitolo 4

Analisi del rischio su un impianto stradale di GNL

Ai fini della presente tesi vengono esaminati gli elementi pericolosi andando a identificare i possibili scenari accidentali relativi alla sezione di impianto destinata al GNL.

4.1 Applicazione metodologia HAZOP – Hazard & Operability Analysis

Nei seguenti paragrafi si mostrano i risultati della metodologia HAZOP applicata ai seguenti nodi dell'impianto: stoccaggio, erogazione e pompa criogenica.

4.1.1 Stoccaggio

Intenzione di progetto: stoccaggio GNL ai valori di temperatura e pressione forniti dal produttore del serbatoio				
Parte considerata: serbatoio criogenico				
Parola guida	Deviazioni	Cause possibili	Conseguenze	Azioni richieste
Più di	Livello	(1) Guasto al sistema di misura	Overflow	(a) Installare sistema misura e allarme livello, con blocco automatico del riempimento
	Temperatura	(2) Ingresso di aria nell'intercapedine	Passaggio di stato, aumento di pressione	(b) Installare sistema di controllo del grado di vuoto nell'intercapedine
		(3) Irraggiamento	Passaggio di stato	(b) Installare sistema di controllo del grado di vuoto nell'intercapedine
	Pressione	(4) Surriscaldamento	Sollecitazione serbatoio	(c) Installare sistema di controllo pressione; (d) sistema di valvole di sicurezza convogliate in torcia fredda
Meno di	Temperatura	(5) Immissione di prodotto non conforme	Sollecitazione termica serbatoio e impianto	(e) Installare sistema di controllo della temperatura
	Pressione	(6) Carico di prodotto dall'alto	Passaggio di stato	(f) Installare sistema di controllo pressione; (g) caricare prodotto dal basso; (h) attivare vaporizzatore atmosferico di alta pressione

Intenzione di progetto: stoccaggio GNL ai valori di temperatura e pressione forniti dal produttore del serbatoio				
Parte considerata: serbatoio criogenico				
Parola guida	Deviazioni	Cause possibili	Conseguenze	Azioni richieste
Diverso	Prodotto stoccato	(5) Errore umano addetto allo scarico in serbatoio	Perdita economica per contaminazione prodotto, oneri per smaltimento	(i) Predisporre dispositivi di collegamento ad autocisterna univoci

Tabella 4.1 – Applicazione della metodologia HAZOP alla sezione di stoccaggio.

4.1.2 Erogazione

Intenzione di progetto: erogazione GNL per rifornimento utente				
Parte considerata: sezione GNL all'erogatore				
Parola guida	Deviazioni	Cause possibili	Conseguenze	Azioni richieste
Nessuno	Nessun flusso	(1) Assenza di prodotto nel serbatoio	Surriscaldamento pompa di mandata; Mancata erogazione	(a) Installare allarme basso livello serbatoio
		(2) Guasto o anomalia pompa di mandata	Mancata erogazione	(b) Installare sistema rivelazione temperatura, pressione e flusso pompa di mandata che ne comanda l'arresto
		(3) Blocco sulla linea (valvola di intercettazione chiusa per errore)	Surriscaldamento pompa di mandata; Sollecitazione linea; Mancata erogazione	(c) Installare sistema rivelazione stato valvola
		(4) Rottura tubazioni	Rilascio GNL	(d) Istituire programma ispezioni e manutenzione; (e) Installazione rilevatore gas nei pressi dell'erogatore
Più di	Portata	(5) Rimozione accidentale dispositivo di erogazione	Rilascio GNL	(f) Installare sistema rivelazione portata e valvola di eccesso di flusso
	Temperatura	(2) Guasto o anomalia pompa di mandata	Passaggio di stato prodotto	(g) Installare rilevazione temperatura nel terminale di erogazione
	Pressione	(2) Guasto o anomalia pompa di mandata	Sollecitazione linea, erogatore e serbatoio utente	(h) Installare di sistema di controllo della pressione che interagisce con la testata conto metrica dell'erogatore
Meno di	Portata	(6) Perdita da una flangia	Rilascio GNL	(f) Installare sistema rivelazione portata e valvola di eccesso di flusso

Intenzione di progetto: erogazione GNL per rifornimento utente				
Parte considerata: sezione GNL all'erogatore				
Parola guida	Deviazioni	Cause possibili	Conseguenze	Azioni richieste
Altro	Manutenzione o ispezione	(7) Cedimenti apparecchiature, perdite flange	Rilascio GNL	Come per (4)

Tabella 4.2 – Applicazione della metodologia HAZOP alla sezione di erogazione.

4.1.3 Pompa criogenica di mandata

Intenzione di progetto: trasferimento GNL dal serbatoio criogenico ai dispenser				
Parte considerata: pompa criogenica di mandata				
Parola guida	Deviazioni	Cause possibili	Conseguenze	Azioni richieste
Meno	Prodotto in uscita	Perdita	Formazione di atmosfera esplosiva	Installare sistema rilevazione perdite
	Temperatura	Sollecitazione tubazioni e apparecchiatura	Rischio danneggiamento	Installare sistema di monitoraggio temperatura a monte pompaggio
	Pressione	Caduta pressione tubazioni	Malfunzionamento pompa	Installare sistema monitoraggio pressione a monte pompaggio
Più	Pressione	Malfunzionamento pompa	Sollecitazione tubazioni	Installare sistema di monitoraggio pressione a valle pompaggio; Installare sistema di valvole di sicurezza convogliate in torcia fredda
	Temperatura	Mancato preraffreddamento tubazioni	Malfunzionamento pompa	Installare sistema di monitoraggio temperatura a monte pompaggio
Inverso	Flusso	Arresto erogazione	Malfunzionamento pompa	Installare valvola di non ritorno a valle pompaggio

Tabella 4.3 – Applicazione della metodologia HAZOP alla sezione di pompaggio.

4.2 Applicazione metodologia FTA – Fault Tree Analysis

Nei seguenti paragrafi si riportano i risultati della metodologia albero dei guasti per identificare la frequenza con cui potrebbe accadere il top event identificato grazie alla HAZOP.

4.2.1 Overflow serbatoio

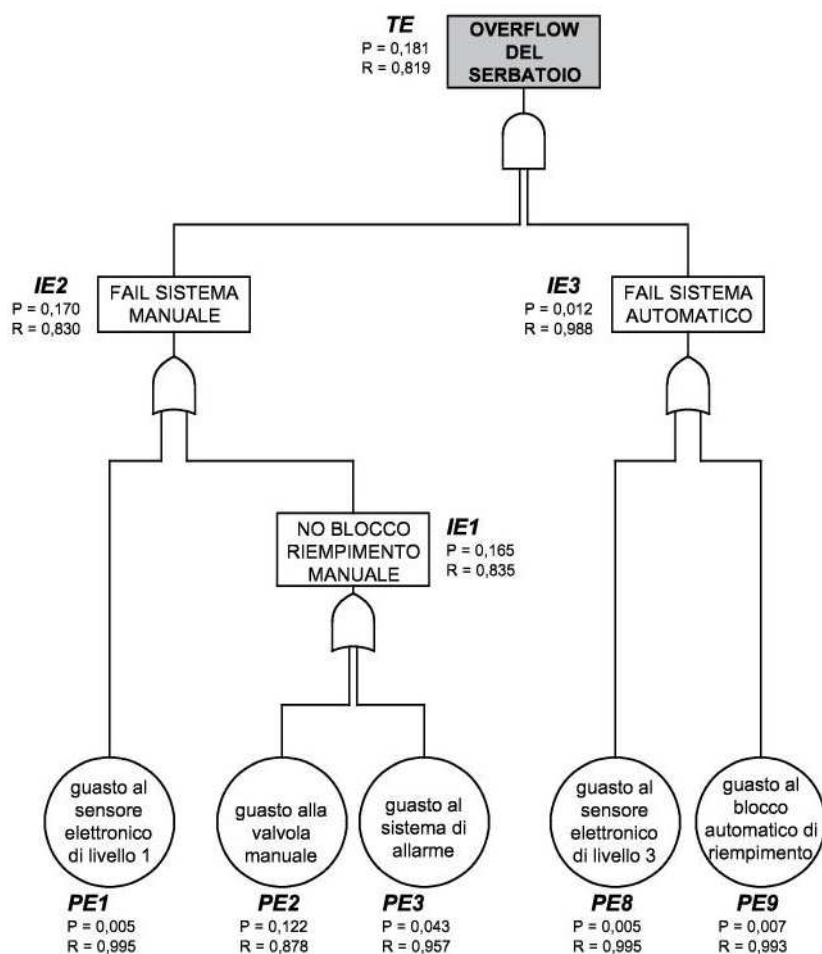


Figura 4.1 – Albero dei guasti relativo al TE “overflow”

Componente, evento	μ [faults/y]	R	P	MTBF[d]
PE1, guasto al sensore elettronico di livello 1	4,56E-03	0,995	0,005	
PE2, guasto alla valvola manuale	1,30E-01	0,878	0,122	
PE3, guasto al sistema di allarme	4,40E-02	0,957	0,043	
IE1, NO BLOCCO RIEMPIMENTO MANUALE		8,350E-01	1,650E-01	
IE2, FAIL SISTEMA MANUALE		8,3050455E-01	1,695E-01	
PE4, guasto al sensore elettronico di livello 1	4,56E-03	0,995	0,005	
PE5, guasto al blocco automatico di riempimento	7,27E-03	0,993	0,007	
IE3, FAIL SISTEMA AUTOMATICO		9,882107E-01	1,179E-02	
TE, OVERFLOW	0,200019	8,187153E-01	1,813E-01	1824,828
				MTBF[Y]
				5,00

Tabella 4.4 – Parametri statistici relativi all’albero dei guasti applicato al TE “overflow”.

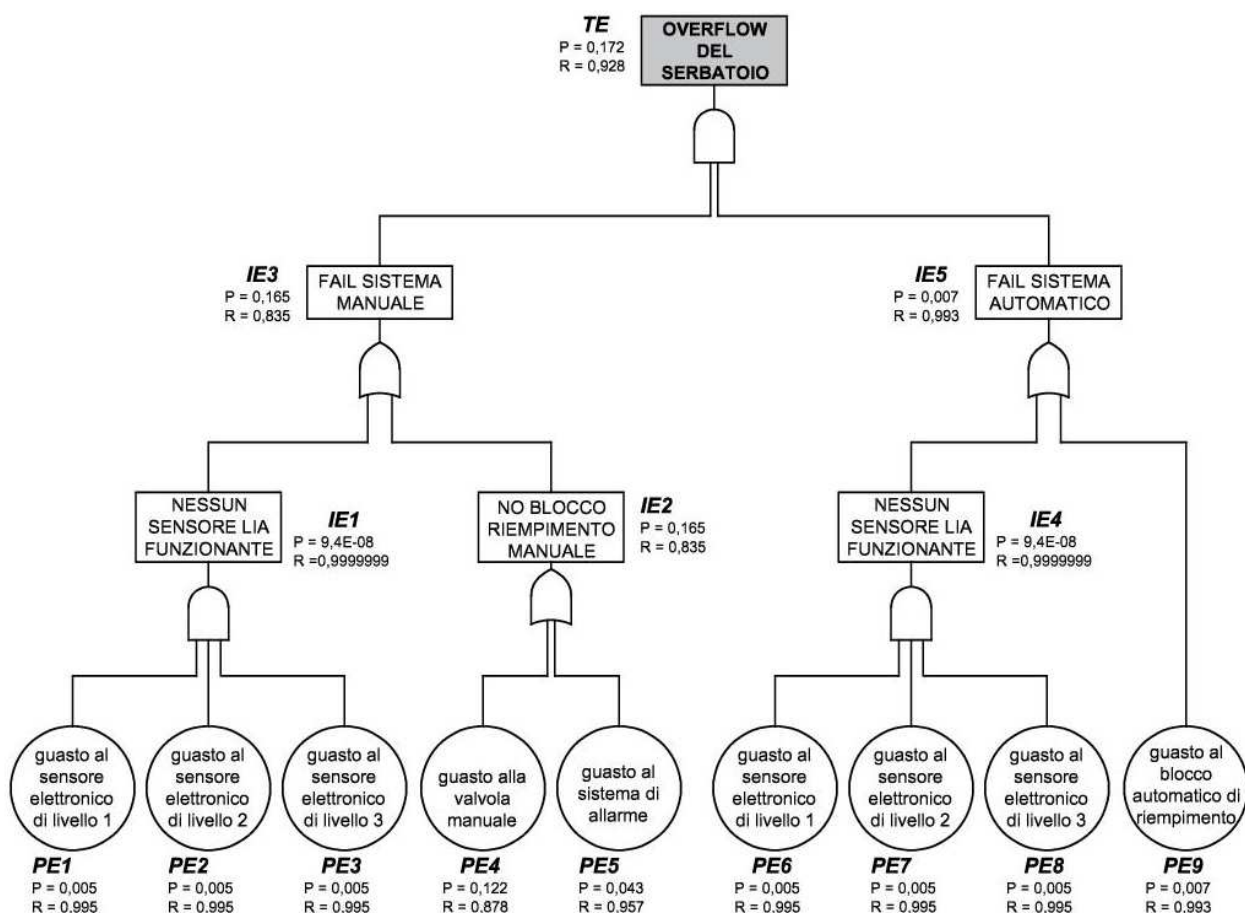


Figura 4.2 – Albero dei guasti relativo al TE “overflow”

Componente, evento	μ [faults/y]	R	P	MTBF[d]
PE1, guasto al sensore elettronico di livello 1	4,56E-03	0,995	0,005	
PE2, guasto al sensore elettronico di livello 2	4,56E-03	0,995	0,005	
PE3, guasto al sensore elettronico di livello 3	4,56E-03	0,995	0,005	
IE1, NESSUN SENSORE DI LIVELLO FUNZIONANTE		9,999999E-01	9,388E-08	
PE4, guasto alla valvola manuale	1,30E-01	0,878	0,122	
PE5, guasto al sistema di allarme	4,40E-02	0,957	0,043	
IE2, NO BLOCCO RIEMPIMENTO MANUALE		8,350E-01	1,650E-01	
IE3, FAIL SISTEMA MANUALE		8,3504929E-01	1,650E-01	
PE6, guasto al sensore elettronico di livello 1	4,56E-03	0,995	0,005	
PE7, guasto al sensore elettronico di livello 2	4,56E-03	0,995	0,005	
PE8, guasto al sensore elettronico di livello 3	4,56E-03	0,995	0,005	
IE4, NESSUN SENSORE DI LIVELLO FUNZIONANTE		9,999999E-01	9,388E-08	
PE9, guasto al blocco automatico di riempimento	7,27E-03	0,993	0,007	
IE5, FAIL SISTEMA AUTOMATICO		9,927555E-01	7,245E-03	
TE, OVERFLOW	0,188978	8,278048E-01	1,722E-01	1931,442
			MTBF[Y]	5,29

Tabella 4.5 – Parametri statistici relativi all'albero dei guasti applicato al TE “overflow”.

4.2.2 Rilascio da erogatore

Gli erogatori di GNL sono apparecchiature destinate al travaso di combustibile dal serbatoio di stoccaggio al serbatoio degli automezzi, per mezzo della pompa criogenica installata in prossimità del serbatoio di stoccaggio. Durante il rifornimento viene realizzato il ciclo chiuso inserendo nell'apposito vano del veicolo la doppia tubazione flessibile dell'erogatore, le cui condotte sono destinate rispettivamente al rifornimento e al ritorno dei gas di evaporazione. Allo stato attuale, sebbene la maggioranza dei mezzi pesanti alimentati a GPL sia dotata di un apposito dispositivo che impedisce la partenza del mezzo durante il rifornimento, gli erogatori non sono dotati di un sistema di blocco del rifornimento in caso di partenza del veicolo. La sicurezza dell'operazione di rifornimento è demandata alla presenza di un rilevatore di gas installato in prossimità dell'erogatore, collegato a un sistema di allarme e a una valvola di intercettazione automatica posta a monte dell'erogatore. Nel vano erogatore è inoltre presente una valvola di intercettazione al fine di interrompere un eventuale sversamento accidentale.

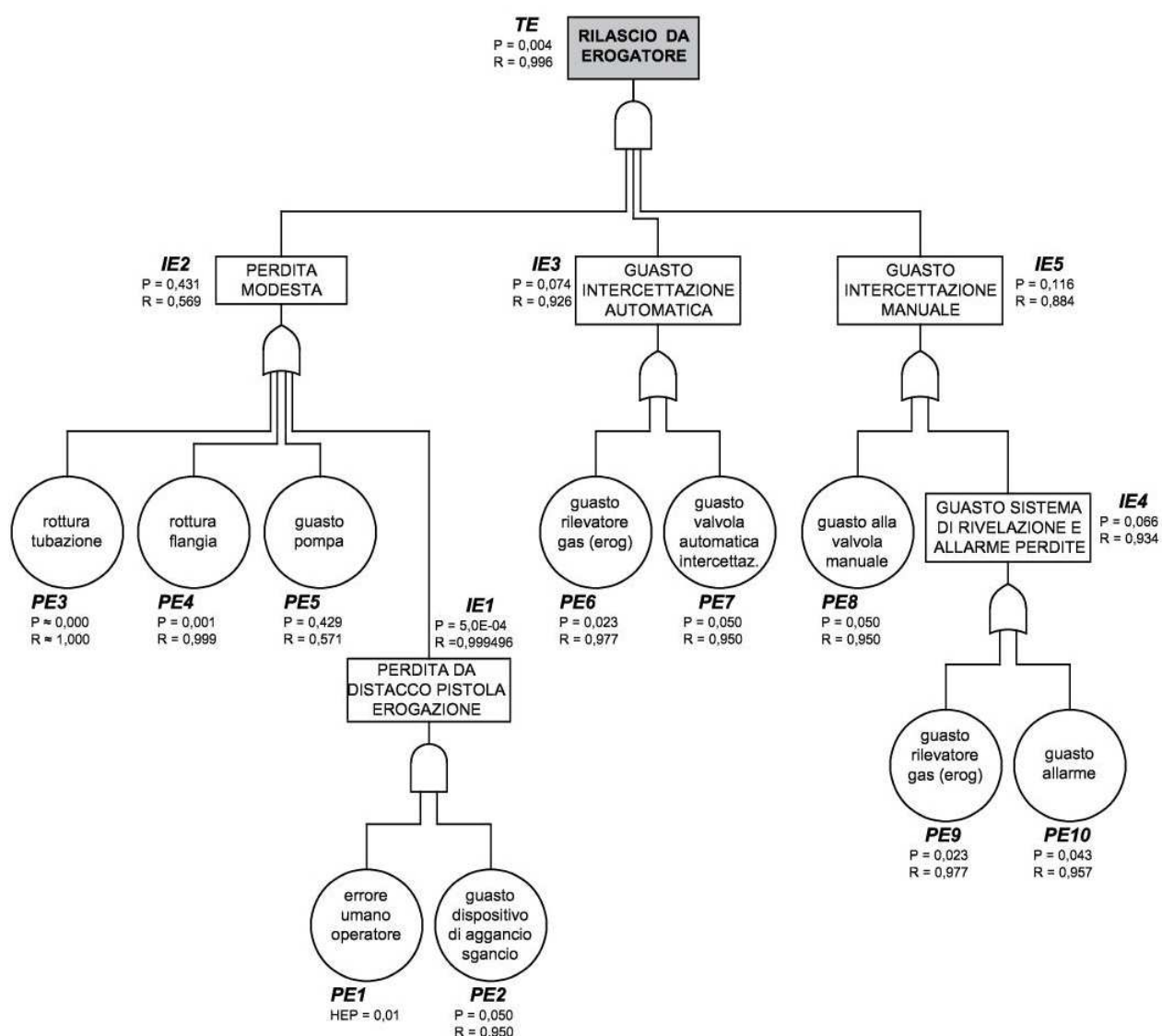


Figura 4.3– Albero dei guasti relativo al TE rilascio da erogatore

Componente, evento	μ [faults/y]	R	P	MTBF[d]
PE1, errore umano operatore			0,010	
PE2, guasto dispositivo di sgancio	5,17E-02	0,950	0,050	
IE1, PERDITA DA DISTACCO PISTOLA		9,994963E-01	5,037E-04	
PE3, rottura tubazione	1,84E-05	1,000	0,000	
PE4, rottura flangia	9,64E-04	0,999	0,001	
PE5, guasto alla pompa	5,61E-01	0,571	0,429	
IE2, PERDITA MODESTA		5,693584E-01	4,306E-01	
PE6, guasto al rilevatore gas	2,37E-02	0,977	0,023	
PE7, guasto valvola di controllo portata	5,17E-02	0,950	0,050	
IE3, GUASTO INTERCETTAZIONE AUTOMATICA		9,262544E-01	7,375E-02	
PE8, guasto alla valvola manuale	5,17E-02	0,950	0,050	
PE9, guasto al rilevatore gas	2,28E-02	0,977	0,023	
PE10, guasto allarme	4,40E-02	0,957	0,043	
IE4, GUASTO RIVELAZIONE ALLARME		9,344354E-01	6,556E-02	
IE5, GUASTO INTERCETTAZIONE MANUALE		8,840643E-01	1,159E-01	
TE, RILASCIO DA EROGATORE	0,003688672	9,963181E-01	3,682E-03	98951,6
				MTBF[Y]
				271,10

Tabella 4.6 – Parametri statistici relativi all'albero dei guasti applicato al TE "rilascio da erogatore".

Le tipologie di rilascio più probabili per quanto riguarda la fase di erogazione sono costituite da perdite di quantitativi ridotti da tubazioni, flange e saldature. Tali perdite sono rilevabili grazie a all'apposito sistema installato e pertanto risultano facilmente eliminabili prima che possano costituire un pericolo per le persone. Inoltre, un idoneo piano di ispezione e manutenzione incrementa ulteriormente l'affidabilità e la sicurezza del sistema. Nella tabella che segue viene mostrata l'ulteriore implementazione dell'affidabilità del sistema triplicando i sensori per la rilevazione di gas (Tab. 4.7).

Componente, evento	μ [faults/y]	R	P	MTBF[d]
PE1, errore umano operatore			0,010	
PE2, guasto dispositivo di sgancio	5,17E-02	0,950	0,050	
IE1, PERDITA DA DISTACCO PISTOLA		9,994963E-01	5,037E-04	
PE3, rottura tubazione	1,84E-05	1,000	0,000	
PE4, rottura flangia	9,64E-04	0,999	0,001	
PE5, guasto alla pompa	5,61E-01	0,571	0,429	
IE2, PERDITA MODESTA		5,693584E-01	4,306E-01	
PE6, guasto a n. 3 rilevatori di gas		9,9999E-01	1,277E-05	
PE7, guasto valvola di controllo portata	5,17E-02	0,950	0,050	
IE3, GUASTO INTERCETTAZIONE AUTOMATICA		9,496161E-01	5,038E-02	
PE8, guasto alla valvola manuale	5,17E-02	0,950	0,050	

Componente, evento	μ [faults/y]	R	P	MTBF[d]
PE9, guasto a n. 3 rilevatori di gas		9,9999E-01	1,277E-05	
PE10, guasto allarme	4,40E-02	0,957	0,043	
IE4, GUASTO RIVELAZIONE ALLARME		9,569412E-01	4,306E-02	
IE5, GUASTO INTERCETTAZIONE MANUALE		9,065701E-01	9,343E-02	
TE, RILASCIO DA EROGATORE	0,002029243	9,979728E-01	2,027E-03	179870
				MTBF[Y]
				492,79

Tabella 4.7 – Parametri statistici relativi all'albero dei guasti applicato al TE "rilascio da erogatore".

4.3 Analisi con albero degli eventi

Come già trattato, densità e punto di ebollizione del GNL sono parametri variabili in quanto dipendono dalla composizione della miscela, poiché il GNL non ha una composizione standard. Il gas naturale, in condizioni atmosferiche, presenta una densità inferiore a quella dell'aria, che ne rende agevole la dispersione a seguito di rilascio. Ciò non avviene istantaneamente quando si verifica un rilascio su larga scala di gas naturale liquefatto, che per un certo tempo presenta una densità maggiore rispetto a quella dell'aria. L'area coperta da una nube a seguito di rilascio di GNL presenta uno sviluppo direttamente proporzionale all'entità del rilascio e in caso di particolari condizioni atmosferiche può propagarsi a distanza dalla fonte del rilascio rimanendo al di sotto del limite inferiore di esplosività. Le nubi di GNL presentano la tipica forma allungata in base alla direzione del vento. Conseguentemente a un rilascio, gli scambi termodinamici con l'aria circostante determinano l'aumento di temperatura del GNL, che superati i -110 °C circa, presenta una densità inferiore a quell'aria tale da consentire la dispersione in atmosfera. I principali fattori meteorologici che influenzano la dispersione del gas naturale in atmosfera sono vento, temperatura e umidità dell'aria, oltre a fattori morfologici quali la rugosità del terreno. Il campo di esplosività ristretto (5-15%) e la capacità di dispersione dovuta alla bassa densità sono caratteristiche che rendono meno probabile l'innescò di una nube di GNL rispetto ad altri gas. Uno dei parametri più rilevanti in caso di rilascio è la distanza della nube di GNL rispetto alla fonte della perdita, in quanto la concentrazione decresce alla distanza dal rilascio fino a un punto in cui la miscela gas-aria attraversa il campo di esplosività; e, a seconda del contesto, occorre valutare la presenza di potenziali fonti di innesco. Per quanto riguarda l'innescò di una pozza di GNL, la letteratura scientifica indica che nella maggioranza dei casi non è possibile estinguere direttamente l'incendio di pozza ma occorre intervenire interrompendo l'apporto di combustibile agendo sulla fonte della perdita.

Di seguito vengono esposti due alberi degli eventi relativi a punti cruciali dell'impianto in esame, ovvero il serbatoio di stoccaggio (Fig. 4.4) e le condotte di GNL (Fig. 4.5). Tra i possibili sviluppi di un rilascio si hanno dispersione senza ignizione, incendio ed esplosione, negli alberi degli eventi viene mostrato come la risposta all'emergenza è in grado di determinare gli sviluppi di un evento indesiderato e le relative conseguenze. Come esposto nella sezione descrittiva, i pericoli principali

per l'uomo sono dovuti al calore irradiato dall'incendio, al contatto con le fiamme, all'esplosione e al contatto o inalazione col gas criogenico a bassa temperatura.

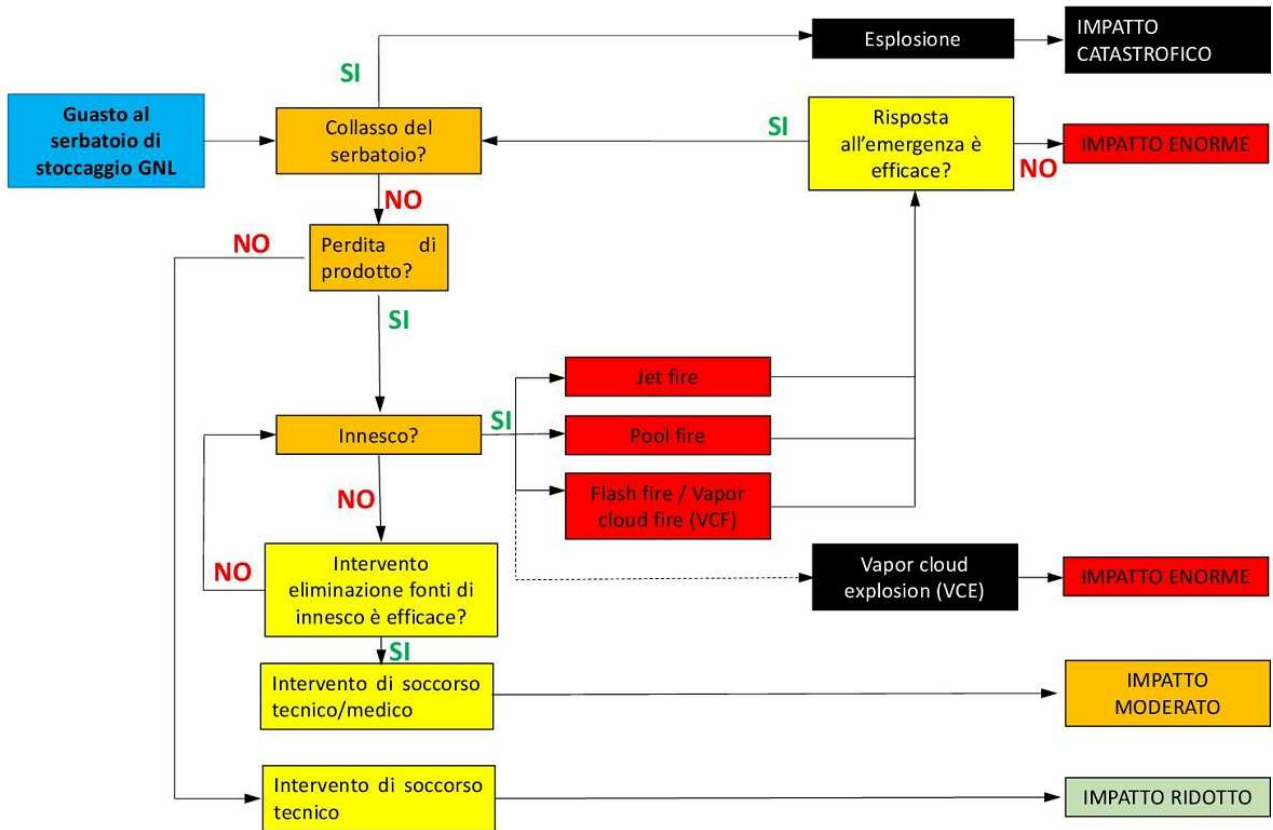


Figura 4.4 – Albero degli eventi relativo al guasto di un serbatoio di GNL

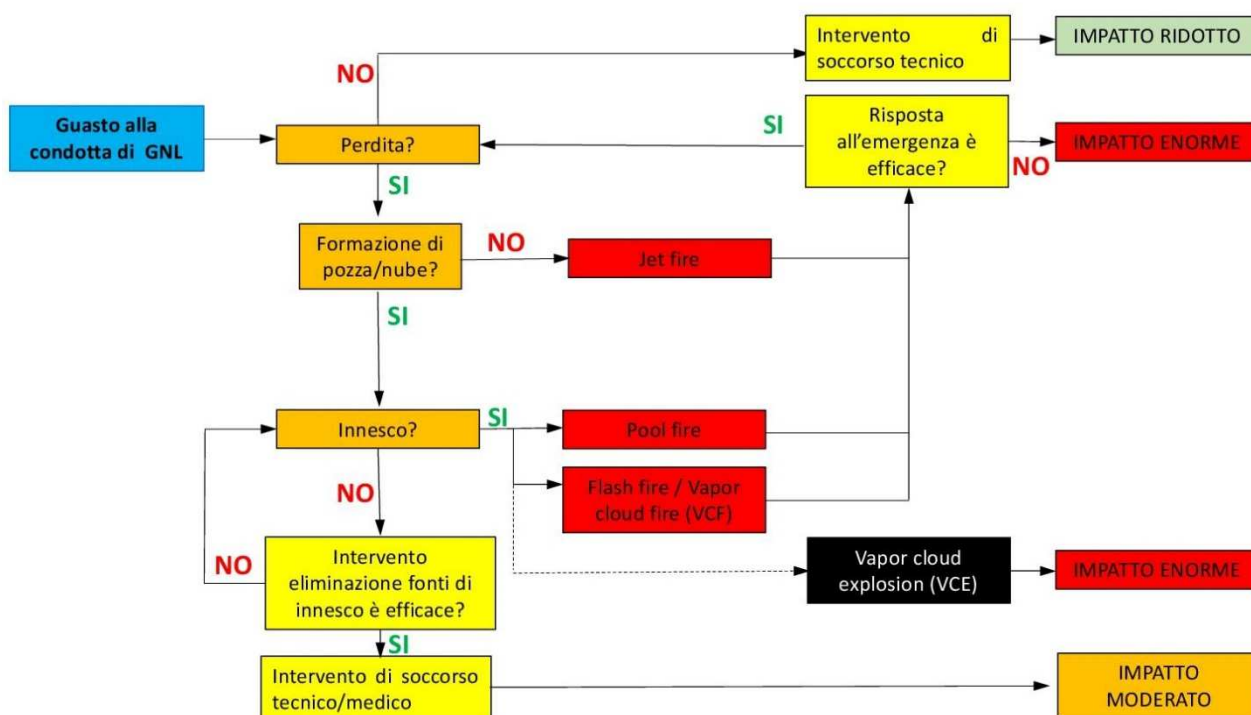


Figura 4.5 – Albero degli eventi relativo al guasto di una condotta di GNL

4.4 Classificazione dei luoghi con pericolo di esplosione

Nel seguente paragrafo viene proposto un esempio di determinazione delle zone pericolose dell'impianto relativamente alla classificazione *Atex* secondo la metodologia prevista dalla norma CEI EN 60079-10-1 "Classificazione dei luoghi - Atmosfere esplosive per la presenza di gas". L'approccio utilizzato per l'identificazione del rilascio può essere riassunto nelle seguenti fasi:

- Identificazione delle fonti di rilascio da analizzare;
- Determinazione dell'entità del rilascio per ogni fonte di rilascio identificata;
- Valutazione delle condizioni di ventilazione e dell'efficacia dei ricambi di aria;
- Determinazione del tipo di zona in base al grado di rilascio e all'efficacia della ventilazione e dei ricambi di aria;
- Determinazione dell'estensione volumetrica della zona sopra determinata.

La classificazione riguarda sia zone ubicate all'interno che all'esterno, in particolare sono state esaminate le seguenti sezioni significative:

- Pompa criogenica di mandata (esterno);
- Erogatore di GNL (interno);
- Punto di travaso da autocisterna a serbatoio criogenico (esterno).

Per quanto riguarda le tipologie di emissione, nella classificazione delle zone sono state considerate tutte emissioni di grado primo, ossia relative alla possibilità di emissione di gas infiammabile durante il normale funzionamento delle apparecchiature.

La probabilità che sia disponibile un flusso di aria determina la disponibilità di ventilazione, che può essere classificata come buona (con portata e continuità costante), adeguata (portata pressoché costante durante il funzionamento dell'impianto) o scarsa. In funzione del grado di emissione e del grado di ventilazione, il tipo di zona può essere stimato secondo la tabella D.1 della CEI EN 60079-10-1 (tabella 4.8).

Grado dell'emissione	Grado di Ventilazione						
	Alto			Medio			Basso
	Disponibilità						
	Buona	Adeguate	Scarsa	Buona	Adeguate	Scarsa	Buona Adeguate Scarsa
Continuo	Zona 0 NE [1] Zona non pericolosa	Zona 0 NE [1] [+] Zona 2 [3]	Zona 0 NE [1] [+] Zona 1 [3]	Zona 0	Zona 0 [+] Zona 2 [3]	Zona 0 [+] Zona 1 [3]	Zona 0
Primo	Zona 1 NE [1] Zona non pericolosa	Zona 1 NE [1] [+] Zona 2 [3]	Zona 1 NE [1] [+] Zona 2 [3]	Zona 1	Zona 1 [+] Zona 2 [3]	Zona 1 [+] Zona 2 [3]	Zona 1 o Zona 0 [2]
Secondo	Zona 2 NE [1] Zona non pericolosa	Zona 2 NE [1] Zona non pericolosa	Zona 2 NE [1] [4]	Zona 2	Zona 2 [4]	Zona 2 [4]	Zona 1 o anche Zona 0 [2]
Note: [+] = circondata da; [1] Zona 0 NE, 1 NE, 2 NE indicano una zona teorica in cui, in condizioni normali, l'estensione è trascurabile; [2] Corrisponde a zona 0 se la ventilazione è così debole o l'emissione è tale per cui un'atmosfera esplosiva è presente in continuo, ossia la ventilazione è prossima a essere nulla; [3] La zona è determinata con la ventilazione residua presente nei periodi di tempo in cui viene a mancare la ventilazione assunta per la valutazione; [4] Quando è possibile la presenza di emissioni di secondo grado in concomitanza di periodi in cui viene a mancare la ventilazione assunta, oltre alla zona 2 deve esserne prevista un'altra, determinata considerando la ventilazione residua.							

Tabella 4.8 – Zone per grado di emissione ed effetto della ventilazione
(Tabella D.1 della norma CEI EN 60079-10-1:2016)

L'estensione della zona pericolosa dovuta all'emissione di gas infiammabile dipende da fattori quali le proprietà del gas, le dimensioni del foro di rilascio, le caratteristiche dell'ambiente circostante. Per la stima dell'estensione della zona pericolosa la sopra citata norma propone il seguente diagramma (Figura 4.6) in alternativa all'utilizzo di metodologie di fluidodinamica computazionale.

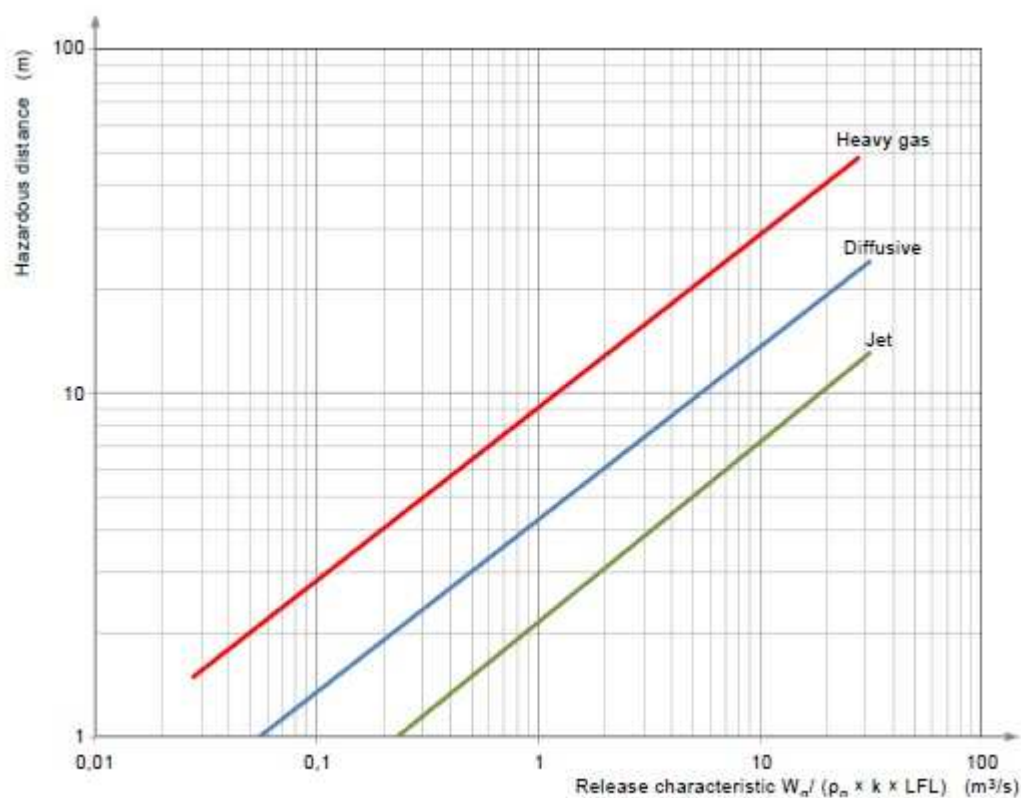


Figure D.1 – Chart for estimating hazardous area distances

Figura 4.6 – Stima estensione zona pericolosa

4.4.1 Pompa criogenica di mandata

Di seguito si riportano i dati e i risultati per determinare la classificazione della zona *Atex* relativa alla pompa criogenica.

Ambiente	aperto
T_{amb}	20 °C
P_{atm}	101325 Pa
Pressione interna relativa	20 bar (pressione massima di progetto)
Fattore di efficacia della ventilazione	f = 2 [-]
Altezza sorgenti di emissione dal suolo	< 3 m
Velocità minima del vento	w = 0,25 m/s
Disponibilità ventilazione	buona
Grado di emissione	primo
Fase emissione:	vapore
Area del foro di emissione	2,5 mm ²
Coefficiente di efflusso	0,8
Temperatura sostanza fuoriuscita	20°C

Distanza percorso fuoriuscita	0 m
Coefficiente f	1 [-]
Portata di emissione Q_t	0,003182452 kg/s
Portata di emissione Q_g	0,003182452 kg/s
Portata di emissione Q_l	0 kg/s
Controllo dell'ambiente	non sorvegliato
Emissione	grado secondo – fase aeriforme
Numero di ricambi d'aria C_o:	0,1260036 s ⁻¹
Portata minima di ricambi d'aria	0,238508 m ³ /s
Tempo di persistenza t:	114,19 s
Volume V_{ex}:	1,892866 m ³
Volume V_z:	3,785732 m ³ (non trascurabile)
Grado della ventilazione:	medio
Direzione emissione	non nota
Tipo di zona:	Zona 2
Distanza Pericolosa d_z:	1,98407 m
Quota	1,984 m
Volume zona pericolosa:	32,72 m ³
Forma della zona pericolosa:	sferica

Tabella 4.9 – Classificazione Atex zona pompa criogenica di mandata

4.4.2 Erogatore – alloggi idraulici interni

Di seguito si riportano i dati e i risultati per determinare la classificazione della zona *Atex* relativa all'erogatore.

Ambiente	chiuso
Volume libero	0,69 m ³
T_{amb}	20 °C
P_{atm}	101325 Pa
Pressione interna relativa	20 bar (pressione massima di progetto)
Fattore di efficacia della ventilazione	f = 2 [-]
Velocità minima del vento	w = 0,1 m/s
Disponibilità ventilazione	buona
Tipo ventilazione	naturale
Portata d'aria per ventilazione Q_a	0,0375 m ³ /s

N. ricambi d'aria ventilazione primaria	$C_a = 0,05434783 \text{ s}^{-1}$
Portata d'aria per effetto spinta del vento	$Q_{aw} = 0,0375 \text{ m}^3/\text{s}$
Grado di emissione	primo
Fase emissione:	vapore
Area del foro di emissione	1 mm^2
Coefficiente di efflusso	0,8
Temperatura sostanza fuoriuscita	20°C
Distanza percorso fuoriuscita	0 m
Coefficiente f	1 [-]
Distanza dal soffitto	0,2 m
Portata di emissione Q_t	$0,001272981 \text{ kg/s}$
Portata di emissione Q_g	$0,001272981 \text{ kg/s}$
Portata di emissione Q_l	0 kg/s
Controllo dell'ambiente	non sorvegliato
Emissione	grado secondo – fase aeriforme
Numero di ricambi d'aria C_o:	$0,1 \text{ s}^{-1}$
Portata minima di ricambi d'aria	$0,0954032 \text{ m}^3/\text{s}$
Tempo di persistenza t:	181,68 s
Volume V_{ex}:	$0,954032 \text{ m}^3$
Volume V_z:	1,908064 (non trascurabile)
Grado della ventilazione:	basso
Direzione emissione	non nota
Tipo di zona:	Zona 1 (estesa a tutto l'ambiente interno)

Tabella 4.10 – Classificazione Atex zona erogatori

4.4.3 Punto di travaso GNL

Di seguito si riportano i dati e i risultati per determinare la classificazione della zona *Atex* relativa al punto di travaso di GNL.

Ambiente	aperto
T_{amb}	20°C
P_{atm}	101325 Pa
Pressione interna relativa	5 bar
Fattore di efficacia della ventilazione	$f = 2 [-]$
Altezza sorgenti di emissione dal suolo	$< 3 \text{ m}$

Velocità minima del vento	w = 0,25 m/s
Disponibilità ventilazione	buona
Grado di emissione	primo
Fase emissione:	vapore
Area del foro di emissione	1,3 mm ²
Coefficiente di efflusso	0,8
Temperatura sostanza fuoriuscita	20°C
Distanza percorso fuoriuscita	0 m
Coefficiente f	1 [-]
Portata di emissione Q_t	0,0008274375 kg/s
Portata di emissione Q_g	0,0008274375 kg/s
Portata di emissione Q_l	0 kg/s
Controllo dell'ambiente	Sorvegliato esclusivamente durante le operazioni di travaso
Emissione	grado secondo – fase aeriforme
Numero di ricambi d'aria C_o:	0,1633218 s ⁻¹
Portata minima di ricambi d'aria	0,1240241 m ³ /s
Tempo di persistenza t:	119,73 s
Volume V_{ex}:	0,3796925 m ³
Volume V_z:	1,51866 (non trascurabile)
Grado della ventilazione:	medio
Direzione emissione	non nota
Tipo di zona:	Zona 1
Distanza Pericolosa d_z:	1,53072 m
Quota	1,5 m
Volume zona pericolosa:	15,02 m ³
Forma della zona pericolosa:	sferica

Tabella 4.11 – Classificazione Atex zona pompa criogenica di mandata

Il risultato della classificazione consiste nella determinazione della zona 1 in corrispondenza dell'erogatore e del punto di travaso da autocisterna. Tale classificazione si riferisce a un'area in cui la formazione di un'atmosfera esplosiva, consistente in una miscela di aria e di sostanze infiammabili sotto forma di gas, vapori o nebbia è probabile che avvenga occasionalmente durante le normali attività. Ciò determina un pericolo potenziale per cui si rende necessario eliminare le possibili fonti di innesco attraverso l'installazione di apparecchiature *Atex* idonee a tale zona, oltre che all'adozione delle misure gestionali già trattate nel capitolo precedente.

La zona dove è installata la pompa criogenica è stata classificata come zona 2, ovvero un'area in cui durante le normali attività non è probabile la formazione di un'atmosfera esplosiva o, qualora si verifici, si unicamente di breve durata. Ciò costituisce un pericolo minore rispetto alla zona 1 ma determina comunque l'adozione di apparecchiature e dispositivi certificati *Atex*.

Conclusioni

In base a quanto esposto è possibile riassumere l'analisi del rischio condotta relativamente a un distributore di GNL per autotrazione nelle seguenti conclusioni:

- i. I rischi specifici più rilevanti relativi al gas naturale liquefatto sono quelli dovuti al rilascio di vapori infiammabili e alla sua natura di fluido criogenico;
- ii. Sono state descritte le attività svolte all'interno di un distributore stradale e le apparecchiature atte all'attuazione di tali attività, ovvero: travaso di GNL da autocisterna e stoccaggio in serbatoio criogenico, rifornimento dei veicoli attraverso appositi dispositivi di erogazione con movimentazione del fluido mediante pompe criogeniche, eventuale sezione di gassificazione, stoccaggio e distribuzione di GNC nel caso di impianti L-GNC/GNL;
- iii. Sono state analizzate con la tecnica HAZOP le sezioni di stoccaggio, pompaggio mediante pompa criogenica ed erogazione, sono state identificate le variazioni dei parametri di progetto che possono dar origine ad eventi accidentali e a tale scopo sono stati proposti degli interventi migliorativi;
- iv. Sono state analizzate con la tecnica dell'albero dei guasti le sezioni di stoccaggio, ed erogazione, implementando i sistemi di controllo al fine di ottenere una discreta affidabilità dell'impianto;
- v. Mediante la tecnica dell'albero degli eventi sono stati valutati gli sviluppi conseguenti a un guasto nel serbatoio di stoccaggio e quelli relativi a un rilascio dalle condotte. Da tale studio è emerso che, a seguito di rilascio, il gas naturale si disperde velocemente in atmosfera a causa della rapida evaporazione, a seguito della quale presenta una densità inferiore rispetto all'aria. Inoltre, il ristretto campo di esplosività (5-15%) determina una ridotta probabilità di innesco. In caso di rilascio su larga scala le misure decisive atte a scongiurare impatti ingenti sono costituite dall'eliminazione delle fonti di innesco e dal sezionamento dell'impianto per eliminare la perdita alla fonte. Il GNL presenta inoltre pericoli per l'uomo dovuti alla bassa temperatura di stoccaggio, gli operatori dediti alle operazioni di travaso e di messa in sicurezza devono essere dotati di idonei dispositivi di protezione individuale per la protezione della cute, del corpo e delle vie respiratorie;
- vi. I risultati della classificazione dei luoghi con pericolo di esplosione hanno evidenziato che sono necessari impianti e apparecchiature certificati *Atex*, idonei all'installazione in luoghi con probabile formazione di atmosfere esplosive.

Nomenclatura

f	=	frequenza di accadimento
M	=	magnitudo
P	=	probabilità
R	=	affidabilità, rischio

Lettere greche

μ	=	MTBF (<i>mean time between failures</i>)
-------	---	--

Acronimi

ADR	=	Accordo europeo relativo al trasporto internazionale su strada delle merci pericolose
ADNR	=	Accordo europeo sul trasporto internazionale di merci pericolose per via navigabile
ATEX	=	Acronimo per le direttive relative alle atmosfere esplosive (<i>ATmosphere Explosive</i>)
CLP	=	Regolamento CE 1907/2006 <i>Classification, Labelling and Packaging</i>
DDL	=	Datore di lavoro
DVR	=	Documento di valutazione dei rischi
ETA	=	Tecnica di analisi con albero degli eventi (<i>event tree analysis</i>)
FTA	=	Tecnica di analisi con albero dei guasti (<i>fault tree analysis</i>)
GN	=	Gas naturale
GNC	=	Gas naturale compresso
GNL	=	Gas naturale liquefatto (<i>LNG - liquefied natural gas</i>)
HAZOP	=	Analisi di operabilità (<i>hazard and operability study</i>)
ICAO	=	<i>International Civil Aviation Organization</i>
IMDG	=	<i>International Maritime Dangerous Goods Code</i>
PED	=	2014/68/UE - <i>Pressure Equipment Directive</i>
PIR	=	Prevenzione incidenti rilevanti
RDS	=	Rapporto di sicurezza
SGS	=	Sistema di gestione della sicurezza
TU	=	Testo unico per la salute e sicurezza nei luoghi di lavoro (D.Lgs 81/2008)

Riferimenti bibliografici

1. Zweglinski T. (2022), “*Conventional Event Tree Analysis on Emergency Release of Liquefied Natural Gas*”, *International Journal of Environmental Research and Public health*;
2. DM 30 giugno 2021 “*Approvazione della regola tecnica di prevenzione incendi per la progettazione, la realizzazione e l’esercizio di impianti di distribuzione di tipo L-GNL, L-GNC e L-GNC/GNL per autotrazione alimentati da serbatoi fissi di gas naturale liquefatto*”;
3. De Vincentis M. (2018), intervento presso *Metanauto 2018 – Conferenza sul metano per i trasporti*;
4. CEI EN 60079:2016 Parte 10-1 “*Classificazione dei luoghi – Atmosfere esplosive per la presenza di gas*”
5. D.Lgs. 19 maggio 2016, n. 85 “*Attuazione della direttiva 2014/34/UE*”
6. 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*”;
7. Direttiva 2014/34/UE del 26 febbraio 2014 “*Armonizzazione delle legislazioni degli Stati membri relative agli apparecchi e sistemi di protezione destinati a essere utilizzati in atmosfera potenzialmente esplosiva*”;
8. Direttiva 2012/18/UE “*Controllo del pericolo di incidenti rilevanti connessi con sostanze pericolose*”;
9. D.Lgs. 9 aprile 2008, n. 81 “*Attuazione dell’articolo 1 della legge 3 agosto 2007, n. 123, in materia di tutela della salute e della sicurezza nei luoghi di lavoro*”;
10. Direttiva 2003/105/CE del 16 dicembre 2003, che modifica la direttiva 96/82/CE del Consiglio sul “*Controllo dei pericoli di incidenti rilevanti connessi con determinate sostanze pericolose*”;
11. DM 24 maggio 2002 “*Norme di prevenzione incendi per la progettazione, costruzione ed esercizio degli impianti di distribuzione stradale di gas naturale per autotrazione*”;
12. Zanelli S. (1999) *Affidabilità e sicurezza nell’industria di processo*, Università di Pisa;
13. Direttiva 1999/92/CE del 16 dicembre 1999, “*Prescrizioni minime per il miglioramento della tutela della sicurezza e della salute dei lavoratori che possono essere esposti al rischio di atmosfere esplosive*”;
14. Direttiva 96/82/CE del 9 dicembre 1996 sul “*Controllo dei pericoli di incidenti rilevanti connessi con determinate sostanze pericolose*”;
15. Direttiva 82/501/CEE del 24 giugno 1982 “*Direttiva del Consiglio sui rischi di incidenti rilevanti connessi con determinate attività industriali*”