

POLITECNICO DI TORINO

Collegio di Ingegneria Chimica e dei Materiali

**Corso di Laurea Magistrale
in Ingegneria Chimica e dei Processi Sostenibili**

Tesi di Laurea Magistrale

La valutazione dei rischi in ambito industriale: Probabilità di innesco di sostanze infiammabili



Relatore

firma del relatore
prof. Micaela Demichela

Candidato

firma del candidato
Maria Alejandra Restrepo Mejía

Marzo 2020

Indice

1. Introduzione	1
2. Valutazione e l'analisi dei rischi	3
2.1 Identificazione dei pericoli.....	5
2.1.1 Analisi degli eventi esterni	5
2.1.2 Analisi storica.....	6
2.1.3 PHA - Process hazard analysis	6
2.1.4 HAZOP - Hazard and Operability	6
2.1.5 Analisi "What if"	7
2.1.6 Checklist.....	7
2.1.7 FMEA.....	7
2.2 Stima delle conseguenze - Danno	7
2.3 Stima delle frequenze.....	8
2.3.1 Alberi dei guasti	8
2.3.2 Alberi degli eventi	9
2.4 Miglioramento - Modifiche.....	10
3. Miscele Esplosive	11
3.1 Proprietà delle sostanze.....	11
3.1.1 Proprietà per le sostanze liquide e vapore	12
3.1.2 Proprietà per le polveri	13
3.2 Analisi dei rischi di ambienti esplosivi	14
4. Generalità sugli Inneschi.....	17
4.1 Cosa si intende per innesco?	17
4.2 Come avviene un innesco?.....	18
4.2.1 Auto innesco.....	18
4.2.2 Accensione forzata	18
4.3 Conseguenze che si producono	19
4.3.1 Sfera di fuoco (Fireball)	21
4.3.2 Fuoco da pozza (Pool fire)	21
4.3.3 Getto di fuoco (Jet fire)	22
4.3.4 Incendio serbatoio (Tank fire).....	22
4.3.5 Fuoco istantaneo (Flash fire).....	22
4.3.6 Esplosione di nube di vapore VCE.....	22

4.3.7	Esplosione di nube di vapore confinato:	22
4.3.8	Esplosione del vapore di liquido in ebollizione BLEVE	22
4.3.9	Dispersione (Rilascio di materiale tossico)	23
4.3.10	Detonazione.....	23
4.3.11	Esplosione di Polvere.....	23
4.4	Fonti degli inneschi.....	23
4.4.1	Frizione.....	24
4.4.2	Impatto meccanico	24
4.4.3	Superficie calde	24
4.4.4	Taglio e saldatura	25
4.4.5	Cariche elettrostatiche o scintille statiche	25
4.5	Fattori che incidono nella probabilità di innesco	25
4.5.1	Fattori relativi alle sostanze.....	25
4.5.2	Fattori relativi alla fonte di rilascio	26
4.5.3	Fattori relativi all'ambiente esterno	26
4.6	Controllo delle fonti di innesco.....	27
4.6.1	Classificazione delle aree pericolose.....	27
4.6.2	Limitare i veicoli	28
4.6.3	Controllo delle fonti elettriche	28
4.6.4	Minimizzare il rilascio.....	28
5.	Incidenti storici	29
6.	Modelli per calcolare la Probabilità di Innesco delle Sostanze Infiammabili	31
6.1	CCPS (Center for Chemical Process Safety)	31
6.1.1	Algoritmi di Livello 1.....	32
6.1.2	Algoritmi di Livello 2.....	34
6.1.3	Algoritmi di Livello 3.....	38
6.1.4	Multiple fonti di innesco	41
6.2	Netherlands Organization for Applied Scientific Research TNO.....	41
6.2.1	Innesco immediato	41
6.2.2	Innesco ritardato	42
6.3	BEVI Manual	43
6.3.1	Innesco immediato	45
6.3.2	Innesco Ritardato.....	46
6.4	Changlong et al	46
6.5	International Association of Oil and Gas Producers.....	46

6.6	Moosemiller	47
6.6.1	Innesco immediato	48
6.6.2	Innesco Ritardato.....	48
6.6.3	Esplosione	49
6.7	Rew, Spencer, Daycock	49
6.8	Ronza, Vílchez, Casal	50
6.9	Changlon et al	52
6.10	Strumento di calcolo – Modello CCPS	53
6.10.1	Livello 1	56
6.10.2	Livello 2	57
6.10.3	Livello 3	59
7.	Applicazione	62
7.1	Area di scarica e stoccaggio di metanolo da un'autobotte.....	62
7.1.1	Descrizione del sistema:.....	62
7.1.2	Sostanza di interesse.....	63
7.1.3	Ipotesi incidentale: Rilascio di metanolo in area di travaso per rottura braccio di carico	64
7.2	Reparto di fresatura di una resina RakuTool	80
7.2.1	Descrizione del Sistema	80
7.2.2	Sostanza di interesse.....	81
7.2.3	Ipotesi incidentale.....	83
8.	Analisi e discussione.....	86
9.	Conclusioni	87
10.	Riferimenti bibliografici	88
11.	Appendici.....	90
11.1	Area di scarica e stoccaggio di metanolo da un'autobotte.....	90
11.1.1	Procedura matematica per gli algoritmi di secondo livello.....	90
11.1.2	Procedura matematica per gli algoritmi di terzo livello.....	92
11.2	Reparto di fresatura di una resina RakuTool	97
11.2.1	Procedura matematica per gli algoritmi di secondo livello.....	97
12.	Raccomandazioni finali e ringraziamenti	100

Indice di tabelle

Tabella 3.1: Classificazione delle aree di rischio per le sostanze infiammabili.....	15
Tabella 3.2: Classificazione delle aree di rischio per le polveri combustibili.....	15
Tabella 3.3: Gruppi di esplosione	15
Tabella 4.1: Principali fonti di innesco	24
Tabella 5.1: Incidenti rilevanti (Swuste, et al., 2015)	29
Tabella 6.1: Variabili utilizzate in ciascun livello.....	32
Tabella 6.2: Forza della fonte di innesco, S	35
Tabella 6.3: Stima dell'EVR	39
Tabella 6.4: Probabilità di innesco diretto per installazioni stazionarie.....	41
Tabella 6.5: Probabilità di innesco diretto nelle unità di trasporto	41
Tabella 6.6: Probabilità di innesco per un intervallo di un minuto per un numero di sorgenti	42
Tabella 6.7: Classifica delle sostanze infiammabili	44
Tabella 6.8: Probabilità di innesco diretto per installazioni stazionarie.....	45
Tabella 6.9: Probabilità di innesco diretto nelle unità di trasporto	45
Tabella 6.10: Probabilità di innesco ritardato	46
Tabella 6.11: Dati per le correlazioni.....	46
Tabella 6.12: Valori per i parametri a e b	51
Tabella 6.13: Probabilità di esplosione come funzione della quantità rilasciata	52
Tabella 6.14: Riassunto delle probabilità.....	52
Tabella 6.15: Controllo delle fonti di innesco.....	53
Tabella 7.1: Proprietà del metanolo	64
Tabella 7.2: Albero degli eventi – Rottura del braccio di carico	65
Tabella 7.3: Condizioni di rilascio	66
Tabella 7.4: Probabilità di innesco immediato livello 2.....	67
Tabella 7.5: Probabilità di innesco ritardato livello 2 – caso 1	67
Tabella 7.6: Probabilità di innesco ritardato livello 2 – caso 2	67
Tabella 7.7: Probabilità di innesco ritardato livello 2 – caso 3	67
Tabella 7.8: Probabilità di innesco ritardato livello 2 – caso 4	68
Tabella 7.9: Probabilità di innesco ritardato livello 2	68
Tabella 7.10: Probabilità di esplosione livello 2	68
Tabella 7.11: Probabilità di innesco immediato livello 3.....	69
Tabella 7.12: Tassi di guasto.....	70
Tabella 7.13: Probabilità di innesco ritardato livello 3 – caso 1	70
Tabella 7.14: Probabilità di innesco ritardato livello 3 – caso 2	71
Tabella 7.15: Probabilità di innesco ritardato livello 3 – caso 3	71
Tabella 7.16: Probabilità di innesco ritardato livello 3 – caso 4.....	71
Tabella 7.17: Probabilità di innesco ritardato livello 3	72
Tabella 7.18: Probabilità di esplosione livello 3	72
Tabella 7.19: Probabilità di innesco ritardato per i due livelli	73
Tabella 7.20: Probabilità di esplosione per i due livelli.....	74
Tabella 7.21: Albero degli eventi – Rottura Totale del braccio di carico. Analisi di secondo livello.....	75
Tabella 7.22: Albero degli eventi – Rottura Totale del braccio di carico. Analisi di terzo livello.....	76

Tabella 7.23: Albero degli eventi – Rottura parziale del braccio di carico. Analisi di secondo livello.....	77
Tabella 7.24: Albero degli eventi – Rottura parziale del braccio di carico. Analisi di terzo livello.....	78
Tabella 7.25: Frequenza di accadimento delle conseguenze – Parte 1	79
Tabella 7.26: Frequenza di accadimento delle conseguenze – Parte 2	79
Tabella 7.27: Fonti di innesco	81
Tabella 7.28: Dimensioni delle particelle	82
Tabella 7.29: Parametri caratteristici polvere da resina RakuTool SB SB-0470:	82
Tabella 7.30: Albero degli eventi	83
Tabella 7.31: Probabilità di innesco immediato	83
Tabella 7.32: Probabilità di innesco ritardato	84
Tabella 7.33: Probabilità di esplosione	84
Tabella 7.34: Albero degli eventi	85

Indice di figure

Figura 2.1: Steps per un'analisi dei rischi. Preso da (Casal, 2018).....	4
Figura 2.2: Rapporto tra le diverse arre e metodi nell'analisi di sicurezza. Preso da (Ullmann, 2000).....	5
Figura 2.3: Tipi di danni. Preso da (Casal, 2018)	8
Figura 4.1: Triangolo del fuoco. Preso da (Casal, 2018)	17
Figura 4.2: Incidenti dopo un rilascio di materiale. Preso da (Casal, 2018)	19
Figura 4.3: Caratteristiche e tipi potenziali di accidenti in impianti di processo. Preso da (Ullmann, 2000)	20
Figura 4.4: Tipi di fuoco. Preso da (Casal, 2018)	21
Figura 4.5: Tipi di esplosione. Preso da (Casal, 2018)	21
Figura 6.1: Albero degli eventi. Preso da (CCPS Center for Chemical Process Safety, 2014).....	31
Figura 6.2: Albero degli eventi per un rilascio istantaneo di gas infiammabile. Preso da (National Institute of Public Health and the Environment (RIVM), 2009)	43
Figura 6.3: Albero degli eventi per un rilascio continuo di gas infiammabile. Preso da (National Institute of Public Health and the Environment (RIVM), 2009)	43
Figura 6.4: Albero degli eventi per un rilascio istantaneo di gas liquefatto pressurizzato infiammabile. Preso da (National Institute of Public Health and the Environment (RIVM), 2009).....	43
Figura 6.5: Albero degli eventi per un rilascio continuo di gas liquefatto pressurizzato infiammabile. Preso da (National Institute of Public Health and the Environment (RIVM), 2009).....	44
Figura 6.6: Albero degli eventi per un rilascio di liquido infiammabile. Preso da (National Institute of Public Health and the Environment (RIVM), 2009).....	44
Figura 6.7: Albero degli eventi per calcolare le frequenze. Preso da (Moosemiller, 2011)	48
Figura 6.8: Albero degli eventi. Preso da (Ronza, et al., 2007)	51
Figura 6.9: Benvenuto al programma.....	54
Figura 6.10: Inizio del programma.....	54
Figura 6.11: Lista di sostanze.....	55
Figura 6.12: Proprietà della sostanza	55
Figura 6.13: Elenco dei livelli	55
Figura 6.14: Descrizione livello 1	56
Figura 6.15: Descrizione livello 2	56
Figura 6.16: Descrizione livello 3	56
Figura 6.17: Analisi di primo livello.....	57
Figura 6.18: Scelta delle unità di misura a) e la locazione b)	57
Figura 6.19: Analisi di secondo livello	58
Figura 6.20: Scelta della fonte di innesco a) e dell'unità di tempo b).....	58
Figura 6.21: Dati di magnitudo di sostanza a) unità di massa b) e unità per il foro c)	59
Figura 6.22: Analisi di terzo livello	59
Figura 6.23: Controllo della fonte di innesco.....	60
Figura 6.24: Miglioramenti del terzo livello	60
Figura 6.25: Scelta dei fattori per un evento indoor.....	60
Figura 6.26: FIP per il terzo livello	61
Figura 7.1: Planimetria della baia di scarico e stoccaggio del metanolo. Preso da (ARIA s.r.l., s.f.).....	63

Figura 7.2: Apparecchiatura reparto fresatura	80
Figura 7.3: Modello in scala di un autoveicolo in resina	81
Figura 7.4: Campione di un pannello di resina	82

1. Introduzione

La Sicurezza di Processi è una componente inerente ed essenziale nello sviluppo e produzione di processi industriali, focalizzandosi sulla prevenzione e riduzione degli incidenti tali come rilasci di materiale pericoloso, incendi, esplosioni, e tanti altri. Innanzitutto, è importante distinguere tra questa e la sicurezza sul lavoro in quanto la seconda si riferisce ai rischi presenti nel luogo di lavoro da una prospettiva nettamente locativa piuttosto che di processo, i cui sebbene possano portare avanti degli incidenti gravi, non fanno parte dello scopo del presente lavoro.

Andando un po' più in dettaglio su quello che si svolgerà nelle prossime pagine, si introduce ciò che è la "valutazione dei rischi in ambito industriali". Dunque, come si ha già detto la sicurezza è indispensabile per lo sviluppo di processi per cui si fa oltre che necessario, obbligatorio, avere delle procedure di analisi e valutazione dei pericoli presenti in qualunque fase dei processi, al fine di gestirli di maniera appropriata e ridurre il proprio rischio adottando delle misure di tipo preventivo e/o protettivo.

Come prima approssimazione alla valutazione dei rischi, bisogna fare menzione delle normative esistenti nel mondo riguardo alla sicurezza dei processi. Per questo scopo ci sono dell'entità pubbliche che hanno rilasciato delle procedure da seguire negli impianti di qualsiasi tipo e che per obbligo devono implementarsi per far così, dei posti di lavoro uno spazio sicuro per gli addetti. Queste normative, decreti, regolazioni, solitamente sono il risultato di anni di analisi dei processi propriamente, degli incidenti accaduti, delle necessità delle industrie e tanti altri fattori che incidono sulla sicurezza. Al momento di indagare nelle normative, parlando specificamente su quelle che riguardano la sicurezza e la corretta manipolazione di sostanze di interesse, si trova come indispensabile fare un'ottima analisi dei rischi.

Per effettuare l'analisi ci sono a disposizione delle metodologie che possono avere tre nature diverse che sono qualitativa, semi quantitativa e quantitativa da quanto dipendono del risultato che si va ad ottenere, ovvero se si arriva ad avere una qualificazione come ad esempio una classifica oppure una quantità specifica o entità numerica.

Prendendo come oggetto di studio i metodi quantitativi, si definisce l'analisi quantitativa del rischio o QRA, per il suo nome in inglese (Quantitative Risk Analysis), come una delle metodologie di valutazione dei rischi comunemente utilizzata, specialmente negli impianti industriali così come nelle attività che coinvolgono l'utilizzo di sostanze chimiche, soprattutto quelle di alto grado di pericolosità, per esempio il loro trasporto (Ronza, et al., 2007).

Essendo ancora più concreti, uno degli step che prevede la valutazione dei rischi è la definizione della frequenza di accadimento degli incidenti, la cui tiene conto della frequenza di un evento iniziatore nonché la probabilità di accadimento di una conseguenza generata da tale evento. È indispensabile che questa stima siano le più accurate e reale possibile per avere una buona efficacia nel metodo e più importante ancora, poiché la stima sbagliata comporta ad un grande rischio sia individuale che collettivo (Ronza, et al., 2007).

Insomma, in questo lavoro di tesi si fa una ricerca sulle Atmosfere Esplosive, con lo scopo di capire alcune delle procedure tecniche che ci sono a disposizione per fare la valutazione dei rischi, specificamente si vuole fare uno sguardo sulle normative ATEX ma poi, essendo più specifico sugli step della valutazione, si pretende fare uno studio sulla probabilità di accadimento degli inneschi di sostanze infiammabili, una volta che siano state rilasciate all'ambiente.

Matematicamente lo si potrebbe pensare come qualcosa di semplice, facendo una raccolta di informazione storica riguardante, seguita da un'analisi dove si precisino gli incidenti in cui si sia sviluppato l'innesco e applicando un po' di statistica. Purtroppo, non è così facile dato che non sempre vengono riportati gli incidenti di basso impatto oppure non ci sono tutti i dati necessari come le cause e quindi si avrebbe una sovrastima.

Da un'altra parte sviluppare dei modelli sperimentali è complesso per il fatto che, nella maggioranza delle situazioni, non si possono simulare le condizioni reali della situazione in un piano controllato.

Infine, ci sono anche dei valori proposti da professionisti a seconda della loro esperienza ma questi non sono completamente obiettivi da quanto dipendono del contesto delle sue osservazioni e le sue esperienze, quindi potrebbero esserci tante opinioni diverse per la stessa situazione.

Detto questo, si fa una ricerca bibliografica dei modelli che sono già stati proposti come risultato di diverse analisi fatti dalle aziende, accademia, e ricercatori. In particolare, si spera di applicare il modello proposto dalla CCPS (Center for Chemical Process Safety) il cui è stato pubblicato nell'anno 2016 nel libro "Guidelines for determining probability of ignition of released flammable mass". Per la validazione dei modelli si propongono due casi studio, uno di sostanze infiammabili liquide/vapore proposto dall'azienda italiana ARIA srl, e un caso di polveri proposto dall'azienda ITALDESIGN GIUGIARO.

2. Valutazione e l'analisi dei rischi

L'analisi dei rischi è un procedimento sistematico mediante il quale si individuano i potenziali incidenti da uno scenario o processo, stimando poi le sue cause, conseguenze e la frequenza con cui potrebbero avvenire. La valutazione invece, differisce dall'analisi poiché si considera lo step successivo, cioè prendendo i risultati dell'analisi si vanno a decidere le azioni preventive e/o correttive che si dovrebbero eseguire per ridurre il rischio ai limiti consentiti dalle normative o metodologie esistenti.

Prima di continuare a parlare sulla valutazione dei rischi, le metodologie, normative, fattori incidenti e tutto quanto, occorre approfondire un po' su quello che si intende con la parola "Rischio". È possibile trovare un'ampia gamma di definizioni che variano a seconda del contesto al cui si riferisce, giacché i pericoli sono presenti in tutte le attività svolte quotidianamente, non solo in quelle industriali. Tra le più generali si trova ad esempio che "il rischio è una situazione che può portare ad avere delle conseguenze negative in un determinato evento", semplificando "il rischio è la possibilità di subire un danno" (Ullmann, 2000) ma essendo più specifici la CCPS (Center for Chemical Process Safety, s.f.) lo definisce come "la misura di una lesione umana, un danno ambientale o una perdita economica in termini sia della probabilità dell'incidente che dell'entità del danno o la perdita".

Aldilà delle definizioni qualitative, è indispensabile esprimere il concetto di rischio attraverso un'espressione quantitativa con lo scopo di fare un'analisi obiettivo e pertanto una valutazione complessiva più affidabile. Detto questo, si introduce l'equazione 2.1:

$$R = P \cdot D \quad (2.1)$$

In parole, vuol dire che il rischio (R) è la moltiplicazione tra la probabilità di accadimento, (P) e la magnitudo del danno (D) ovvero la conseguenza.

Dall'equazione 2.1 vengono fuori due concetti che sono la base di tutto analisi: la probabilità o frequenza con cui si manifesta una situazione indesiderata ed il danno o la gravità delle conseguenze; più avanti si spiegheranno più accuratamente.

Tuttavia, fare la valutazione dei rischi di un impianto è una procedura complessa giacché gli incidenti sono eventi sporadici, e quindi non è possibile estrapolare dai dati di un incidente previo. Si può certamente avere una guida valutando però l'insieme di tutti gli incidenti correlati e facendo qualche analisi statistico per avere un approccio e provare a capire le cause, le possibili conseguenze ed il livello di danno, ma senza affidarci ai numeri veri e propri perché ogni incidente ha le sue particolarità e quindi bisogna basarsi nella conoscenza dei dettagli.

Detto questo, per fare l'analisi un incidente deve essere decomposto in piccoli steps, andando da un evento iniziale fino i danni che provoca; dopodiché si attribuiscono le rispettive frequenze e probabilità previste.

Nella Figura 2.1 si rappresenta un diagramma generale, dove si dà un'idea di quelli che sono gli step a seguire e alcune delle metodologie impiegate al loro scopo.

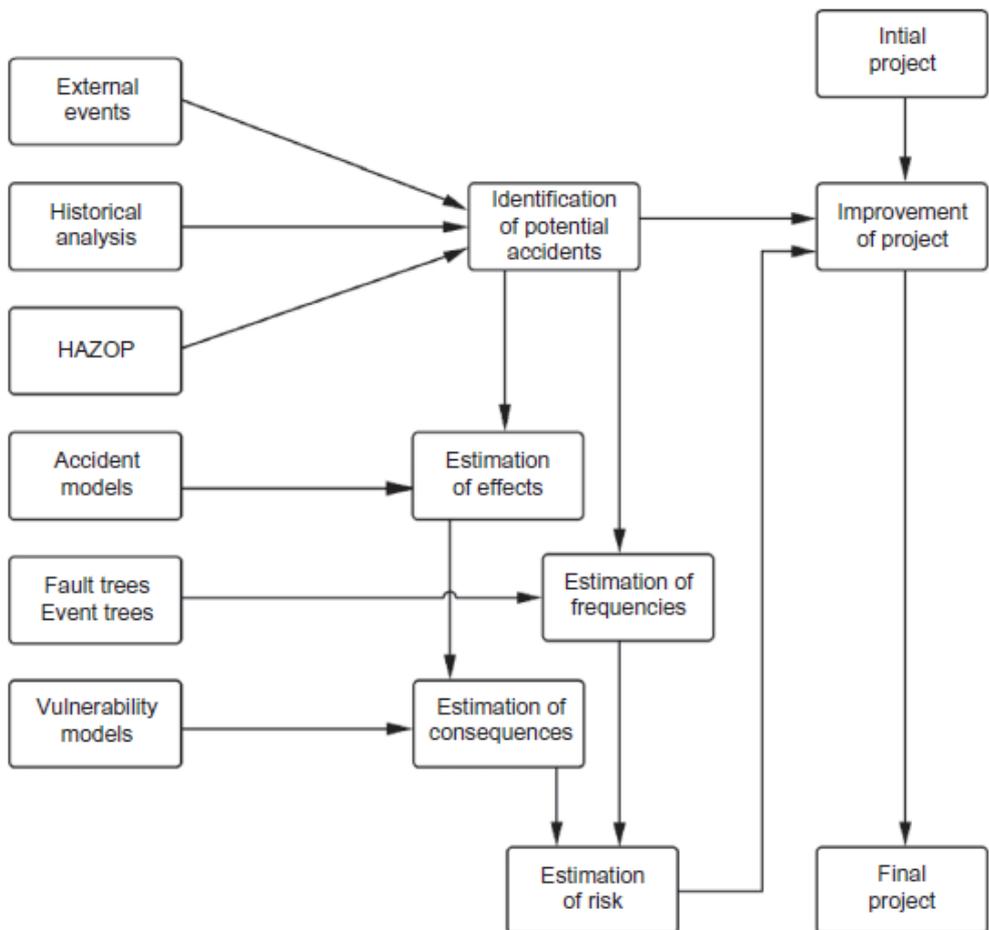


Figura 2.1: Steps per un'analisi dei rischi. Preso da (Casal, 2018)

Da lì si possono distinguere, in linea di massima, tre fasi principali ovvero l'identificazione dei pericoli o dei possibili incidenti, la stima delle frequenze di accadimento e delle conseguenze da cui poi si ricava l'entità del rischio, ed infine si fa vedere uno step di miglioramento (se necessario) dell'attività, progetto, settore, o quello che sia l'oggetto della valutazione.

Prima di spiegare ciascuno degli step, si specifica il fatto che condurre una valutazione dei rischi, il più completa e affidabile possibile, coinvolge due tipi di analisi, uno qualitativo integrato ad uno quantitativo. Nella figura 2.2 si illustra la relazione esistente tra le diverse fonti di informazione ed i metodi di analisi dei sistemi.

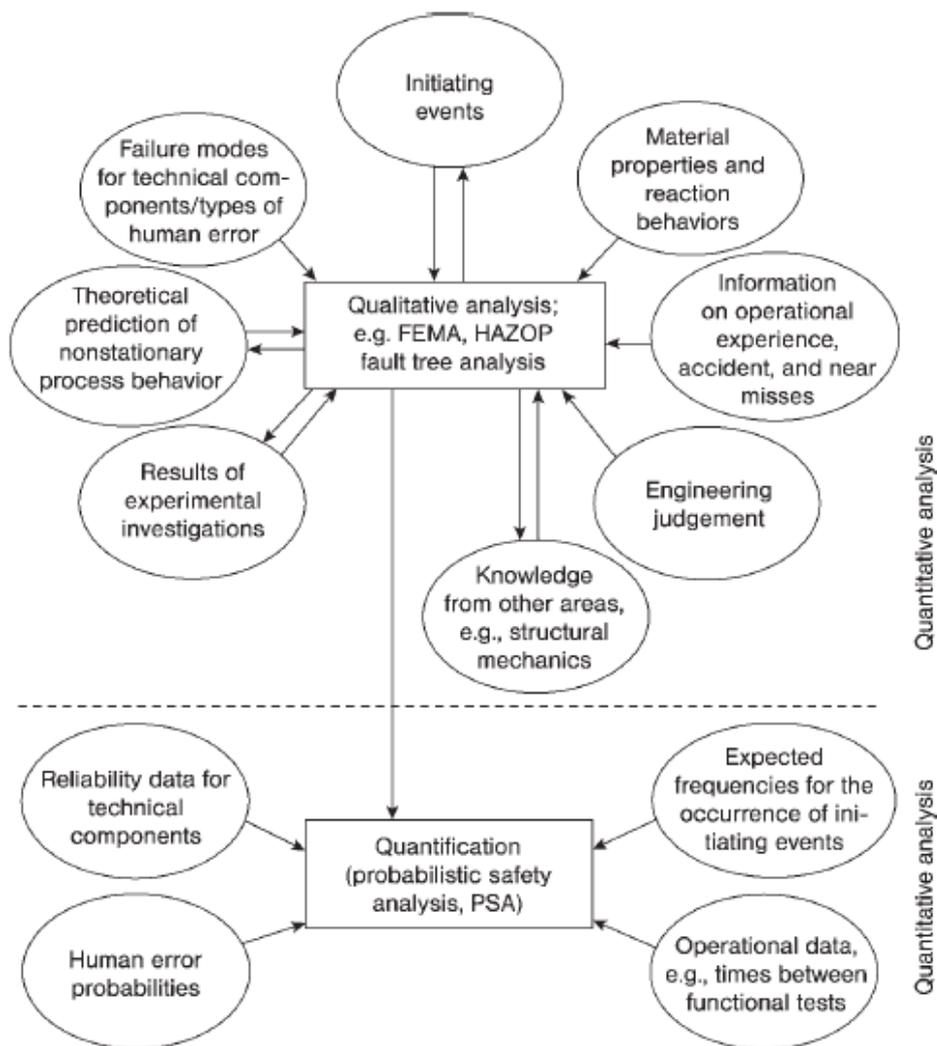


Figura 2.2: Rapporto tra le diverse aree e metodi nell'analisi di sicurezza. Preso da (Ullmann, 2000)

2.1 Identificazione dei pericoli

L'identificazione dei pericoli e dei possibili incidenti è una fase qualitativa nella cui bisogna avere certa esperienza e consapevolezza oltre alla conoscenza approfondita del processo che si sta andando a valutare. Ci sono anche delle procedure che solitamente si suggeriscono di implementare per garantire di fare il riconoscimento più obiettivo e completo possibile; nella Figura 2.1 (Casal, 2018) si indicano alcuni: l'analisi degli eventi esterni, l'analisi storica e la metodologia HAZOP ma ulteriormente ce ne sono altre tecniche molto diffuse che consentono di avere ottimi risultati.

2.1.1 Analisi degli eventi esterni

Non esiste una metodologia stabilita per fare questo tipo di individuazione ma si considera imprescindibile eseguirlo visto che in molti casi gli incidenti sono scatenati dovuti a fattori esterni completamente isolati da quello che sarebbe il processo vero e proprio. Inoltre, bisogna capire cosa succede nei dintorni che possano influenzare il sistema oggetto di analisi e di che maniera.

2.1.2 Analisi storica

Fare un'analisi storica si considera come il primo step da fare nella valutazione riguardo al sistema in questione e consiste nello studio degli incidenti già accaduti in contesti simili, sia in termini di processi, operazioni unitarie e tipi di impianti, che di sostanze coinvolte.

Con quest'informazione si vuole fare uno sguardo e capire quale sono le principali cause di fallimento, così da individuare le debolezze del sistema e/o processo. Parimenti, è possibile servirsi da questi dati e da un'analisi statistico per determinare le frequenze di iniziazione e sviluppare dei modelli di vulnerabilità. Questo però facendo attenzione perché ogni processo ha le sue caratteristiche proprie che lo fanno comportarsi diverso a tutti gli altri, e quindi non si può affidare in un 100% a questi valori. Servono come riferimento ma comunque bisogna fare una validazione dei risultati.

A questo scopo esistono diverse banche dati dagli enti di analisi e/o controllo di sicurezza dove si hanno delle registrazioni degli incidenti e l'informazione rilevante altresì i risultati delle ricerche fatte per individuare le cause. Alcune di queste si elencano a continuazione (Casal, 2018):

- MHIDAS - Major Hazard Incident Data Service
- MARS – Major Accident Reporting System
- PSIC - Process Safety Incident Database
- FACTS - Failure and Accident Technical Information System
- WOAD - World Offshore Accident Database
- PUPAD - Pondicherry University Process-industry Accident Database
- CSB - United States Chemical Safety and Hazard Investigation Board

2.1.3 PHA - Process hazard analysis

Analisi preliminari dei pericoli o PHA (Center for Chemical Process Safety, s.f.) si riferisce all'insieme di attività fatte in maniera organizzata con lo scopo di identificare e valutare i rischi associati a processi e operazioni per consentire di controllarli, prevedendo l'utilizzo delle tecniche sia qualitative che quantitative. Come risultato si fanno delle conclusioni e raccomandazioni da applicarsi nei processi per aiutare alla riduzione del rischio, principalmente quelli di maggiore gravità.

2.1.4 HAZOP - Hazard and Operability

Hazard and Operability o HAZOP (Center for Chemical Process Safety, s.f.) è una tecnica abbastanza diffusa per l'individuazione dei potenziali incidenti, dove si fa un'analisi sistematico dei processi, identificando le fasi delle operazioni e valutando quali sono gli effetti di avere delle deviazioni nelle condizioni di processo o del corretto funzionamento delle apparecchiature.

Per fare ciò si divide un impianto in sezioni o processi, detti nodi, e si impiegano delle parole guida le cui rappresentano le deviazioni, che poi applicandosi alle variabili di operazione permettono di supporre le apposite conseguenze.

Di solito questa procedura viene fatta per un gruppo di esperti aventi diversi background, da ingegneri di processi e sicurezza, controllo di processi, ingegneri civili ed elettrici fino a progettisti di impianti e operazioni

2.1.5 Analisi “What if”

Il metodo di analisi “What if” (Ullmann, 2000) consiste nel farsi una serie di domande che cominciano proprio con questa frase: cosa succede se? cercando di identificare i pericoli. Ciò implica fare una revisione del processo in complessivo a carico di un gruppo di professionali che abbia la conoscenza dell’impianto e tutti i singoli strumenti presenti, utilizzando un elenco di domande predeterminate.

2.1.6 Checklist

Le liste di controllo o checklist non sono altro che una relazione nella cui si riassumono sistematicamente alcune delle esperienze già vissute con lo scopo di ricordare quali sono gli aspetti che devono controllarsi. Certamente questo metodo può avere il livello di dettaglio desiderato ed essere modificato per soddisfare i propri requisiti.

Tuttavia, nell’applicazione delle checklist esiste la possibilità di trascurare dei problemi. Per questo è importante chiarire che questo metodo si usa principalmente come preparazione per posteriormente applicare altri metodi, ma non lo si deve adottare da solo.

2.1.7 FMEA

Failure Mode and Effects Analysis o FMEA metodo induttivo il cui si può classificare come qualitativo o semi qualitativo. Esso consente di determinare le conseguenze dovute al fallimento dei componenti. In altre parole, è un metodo orientato alle attrezzature piuttosto che al processo. L’obiettivo è quello di identificare le debolezze nella progettazione dei sistemi, facendo attenzione nei singoli fallimenti e cercando di capire se si conta con delle misure di backup oppure proponendoli per andare a eliminare tali deficienze.

Una modifica del metodo FMEA è il FMECA, Failure Mode, Effects and Critically Analysis, dove si aspetta che siano individuate o meglio calcolate, le frequenze associate ai danni sviluppati.

2.2 *Stima delle conseguenze - Danno*

È possibile determinare matematicamente le conseguenze di un incidente facendo uso di modelli detti di vulnerabilità, i cui associano l’entità degli effetti ed il grado di danno causato. I fattori da cui dipende la magnitudine del danno sono la massa di sostanza coinvolta, l’energia contenuta, il tempo ed il grado di esposizione.

Ci sono diversi tipi di danni a seconda dell’incidente. Nella Figura 2.2 si fa un elenco di alcuni di essi.

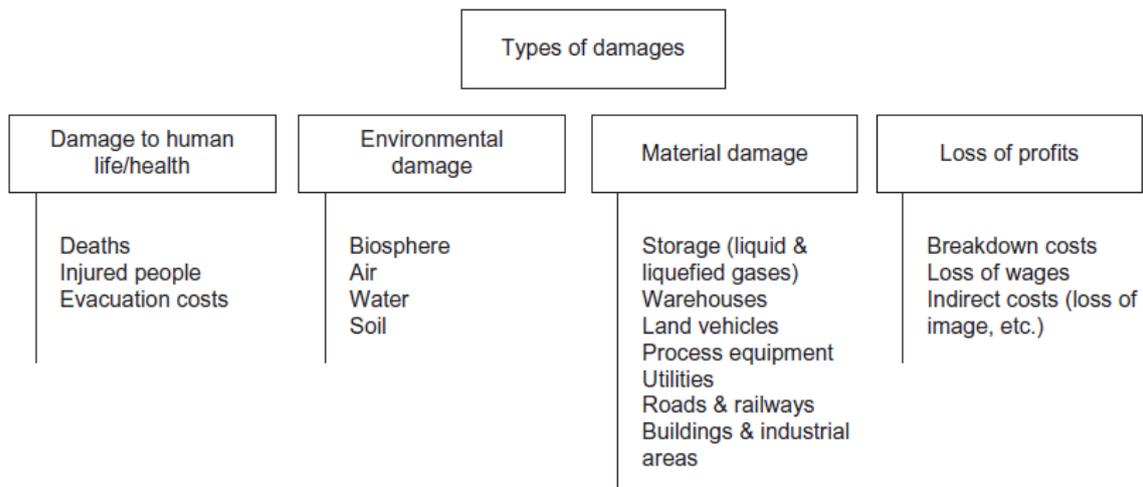


Figura 2.3: Tipi di danni. Preso da (Casal, 2018)

2.3 Stima delle frequenze

Quando si fa un'analisi di rischio quantitativo (QRA), oltre al livello di danno è importante avere un'idea di quanto è possibile che si abbia un certo incidente e con che frequenza. A tal fine ce ne sono, principalmente, due metodologie che consentono di rappresentare logicamente la sequenza degli eventi che si sviluppano fino a raggiungere l'incidente stesso o l'evento iniziatore detto Top Event. Queste sono gli Alberi degli eventi e gli Alberi di guasto.

2.3.1 Alberi dei guasti

Gli alberi di guasto sono rappresentazioni schematiche in cui a partire di un evento iniziatore o incidente, detto Top Event, si seguono delle sequenze logiche e si individuano tutte le possibili cause dette eventi primari. Successivamente, dai dati di frequenza di questi piccoli eventi che vanno dal fallimento di un dispositivo puntuale, sistema di controllo, sistema di sicurezza, ecc. fino allo sbaglio umano, si applicano delle operazioni matematiche logiche per ottenere una stima di quello che è la frequenza del Top Event.

L'analisi dell'albero dei guasti è una procedura completa. Per la sua natura deduttiva produce tutte le combinazioni di eventi che portano all'evento indesiderato se viene applicato in modo coerente. Le limitazioni non sono inerenti al processo di analisi, ma derivano da una possibile mancanza di conoscenza e cura da parte dell'analista.

Può impiegarsi durante la progettazione di un impianto e quindi influenzare la sua configurazione finale, oppure per valutare disegni già esistenti. In quest'ultimo caso si acquisiscono conoscenze sull'efficienza delle procedure di progettazione e sui loro potenziali miglioramenti. L'analisi dell'albero dei guasti dovrebbe essere utilizzata in particolare in caso di scarsa esperienza operativa con un tipo di impianto. In altre parole, è utile per identificare i punti deboli del design in entrambe le sue parti qualitativa e quantitativa; la sintesi di progettazione e analisi di sicurezza porta a un impianto migliore.

Per eseguire un'analisi dell'albero dei guasti (Ullmann, 2000) spiega che sono necessari i seguenti passaggi:

- Familiarizzazione con il processo e l'impianto utilizzando le corrispondenti descrizioni, diagrammi P&I, informazioni dal progettista e dall'operatore dell'impianto, ecc.
- Determinazione degli eventi indesiderati e avvio di eventi utilizzando liste di controllo, informazioni sulle proprietà dei materiali, relazioni sugli eventi e studi su impianti simili.
- Sviluppo dell'albero o degli alberi.
- Preparazione delle probabilità di guasto di componenti tecnici, errore umano e impatti esterni.
- Valutazione numerica del o degli alberi.
- Valutazione dei risultati, proposte di miglioramenti, se necessario, e rinnovata valutazione dell'albero o degli alberi dei guasti dopo aver introdotto i miglioramenti in essi

(Casal, 2018) in congruenza con i primi step appena detti, dice che questo schema, per la sua tipologia, lo si può ottenere seguendo l'analisi HAZOP fatto nella prima fase della valutazione.

2.3.2 Alberi degli eventi

Gli alberi degli eventi anche chiamati analisi di eventi sequenziali (Ullmann, 2000), sono un metodo induttivo che collegano un evento iniziatore con le possibili conseguenze seguendo un ordine logico e dipendendo dal corretto funzionamento o meno dei sistemi di operazione e sicurezza.

Un aspetto utile da distinguere è la distinzione che si può fare tra gli eventi interni ed esterni. Ad esempio, un evento interno è il fallimento di qualche componente sia attivo che passivo (pompa o tubazione), il fallimento nel sistema di controllo o un errore umano; mentre un evento esterno può essere un evento naturale, impatti provenienti da un'industria nelle vicinanze, sabotaggio, ecc.

Certamente è impossibile andare a considerare ogni singolo evento come iniziatore, bisogna riflettere su quali in effetto sono importanti, aventi una frequenza dominante e che possono provocare delle conseguenze maggiori. Con rispetto alle frequenze di essi può tenersi conto il giudizio degli esperti, così come i dati ottenuti dall'esperienza operativa ed i sub eventi in cui si possono decomporre.

A seconda delle contromisure presenti il fallimento o meno di ogni singolo evento dà luogo a biforcazioni delle possibili sequenze. Questo forma dei camini e ciascuno rappresenta uno scenario incidentale avente una conseguenza specifica.

È importante fare attenzione poiché nell'eseguire questa analisi ci sono due aspetti critici: potrebbero esistere dipendenze reciproche e anche verificarsi guasti secondari, vale a dire, per qualsiasi evento di una sequenza, è necessario tenere conto di un possibile impatto da eventi precedenti. Quindi, tutte le probabilità assegnate agli eventi sono probabilità condizionate a seconda dell'esito degli eventi precedenti a quello in esame.

(Ullmann, 2000) proporziona una guida su quali sono gli step a seguire per condurre un'analisi di questo tipo:

Analisi qualitativa

- Identificare (e definire) un evento accidentale (iniziale) rilevante che può dare origine a conseguenze indesiderate
- Identificare le barriere progettate per affrontare ogni singolo evento accidentale
- Costruire l'albero degli eventi
- Descrivere le (potenziali) sequenze di incidenti risultanti

Quantificazione

- Determinare la frequenza dell'evento accidentale e le probabilità (condizionate) dei rami nella struttura degli eventi
- Calcola le probabilità / frequenze per le conseguenze identificate (risultati)
- Compilare e presentare i risultati dell'analisi

2.4 *Miglioramento - Modifiche*

Una volta fatto l'analisi quantitativo (QRA) si deve fare un confronto con i limiti consentiti dalle diverse normative per determinare se bisogna fare delle modifiche nei processi e/o sistemi oppure aggiungere delle barriere protettive che portino ad abbassare il livello di rischio dei pericoli.

3. Miscele Esplosive

Secondo la normativa ATEX, direttiva 1992/92/EC (European parliament and of the council, 1992), un'Atmosfera esplosiva viene definita come una miscela di aria a condizioni atmosferiche con qualche sostanza infiammabile in forma di gas, vapore, nebbia o polvere, dove, dopo che ci sia un innesco, si sviluppa una propagazione della combustione all'intera miscela incombusta.

Questa definizione però, fa riferimento soltanto alle nubi esplosive senza tenere conto i depositi e gli strati di polvere stagnante dove anche esiste la possibilità di avere una propagazione della combustione. Secondo (Eckhoff, 2003) la ragione per cui non si considera necessariamente esplosivo è, perché per avere delle caratteristiche esplosive lo strato deve essere di uno spessore considerevole e quindi coinvolge grandi quantità di polvere oltre al fatto che può impiegare settimane, mesi e addirittura anni in formarsi.

3.1 Proprietà delle sostanze

Al momento di definire le proprietà che sono rilevanti degli ambienti esplosivi e con rischio di innesco, bisogna fare una distinzione tra il tipo di sostanza o meglio tra le fasi di stato, poiché non tutti i parametri importanti per i vapori e liquidi possono essere applicati ai solidi (polveri), oppure esiste una grande difficoltà al momento di determinarli sia con dei modelli che sperimentalmente.

Detto questo, (Eckhoff, 2006) spiega quali sono le differenze e similitudini tra le sostanze polveri e gas. Come prima cosa bisogna sapere che le miscele di gas esplosivo e le nuvole di polvere esplosiva presentano in effetti delle proprietà di innesco ed esplosione simili, ma grazie a ciò è possibile in alcune situazioni fare un "allineamento" sbagliato negli standard di gas e polveri. Alcune delle caratteristiche che assomigliano nei gas premiscelati e nuvole di polveri sono:

- Limiti di infiammabilità / esplosività
- Velocità di combustione laminare e distanze di spegnimento
- La risposta della velocità di combustione alla turbolenza delle nuvole
- Fenomeni di detonazione
- Pressioni esplosive adiabatiche a volume costante di magnitudo simile
- Energie di accensione minime ben definite
- Temperature minime di accensione per determinate condizioni sperimentali

Da parte sua, le differenze basiche tra le polveri ed i vapori sono di fondamentale importanza per la concessione degli standard di sicurezza. Ci sono due nello specifico che determinano il comportamento di essi:

- Le polveri differiscono dai gas, principalmente per i meccanismi di generazione, mantenimento e migrazione della nuvola esplosiva. La fisica che governa questi fenomeni è così diversa che nei casi in cui una nuvola di vapore esplosivo si può formare abbastanza facilmente e altamente probabile che invece una nuvola di polvere non riesca a generarsi.
- Come seconda differenza ci sono i range di concentrazione di combustibile in cui potrebbero innescarsi. Per le miscele di combustibile gas/vapore, la propagazione

della fiamma è possibile soltanto quando la relazione combustibile/aria si trova dentro dei limiti di infiammabilità (LFL e UFL); per le polveri, invece, questo non si limita alla infiammabilità. Lo stato in cui si trova la polvere, cioè come strato o deposito stagnante costituisce un ulteriore regime di propagazione della combustione; dovuto al fatto che nelle polveri ci sarà sempre un po' di aria intrappolata nei vuoti tra le particelle, i cui consentono che la combustione si propaghi anche se molto lentamente.

Un altro aspetto importante che fa distinguere le polveri dai gas è la dinamica delle particelle. Mentre per i gas e vapori, una volta si crea una miscela omogenea con l'aria, questa rimane così grazie al moto molecolare casuale, per le polveri si tende a perdere questa omogeneità. Essendo le particelle di polvere più grosse che le molecole di aria, il moto nella miscela è governato da forze inerziali, includendo la gravità. Inoltre, anche se le collisioni tra le molecole di aria sono elastiche, le collisioni tra particelle di polvere possono dar luogo a formazione di agglomerati favorendo l'assestamento di esse.

3.1.1 Proprietà per le sostanze liquide e vapore

Temperatura di Auto accensione AIT: Temperatura di accensione spontanea nella cui materiale si innesca in assenza di una fonte esterna di innesco; è funzione della cinetica della reazione di ossidazione e la si può associare in certo grado alla struttura chimica molecolare della sostanza. L'aumento della temperatura incrementa la possibilità che una molecola raggiunga l'energia necessaria per rompere i legami e di conseguenza si dia luogo alla formazione di radicali con la presenza di ossigeno.

Limiti di infiammabilità: Esiste un intervallo di concentrazione sotto il quale una sostanza combustibile si può effettivamente innescare. Questo range si conosce come limiti di infiammabilità e rappresentano sia la concentrazione massima (UFL) in cui andando oltre la miscela sarebbe troppo ricca e quindi l'ossigeno presente non è capace di soddisfare la richiesta per poter dare inizio ad una combustione, e dello stesso modo la concentrazione minima dove andando al di sotto succede il comportamento contrario (LFL), cioè l'ossigeno è superiore e quindi non c'è la disponibilità di combustibile necessaria per fare avvenire la reazione.

Dunque, una miscela vapore-aria è infiammabile soltanto quando la sua concentrazione si trova dentro dei limiti LFL e UFL. L'unità di misura solitamente utilizzate per questa proprietà è percentuale volumica di combustibile (Green & Perry, 2008). Questi limiti variano a seconda della temperatura della sostanza diventando più ampi con l'aumento di questa, ovvero sia il LFL diminuisce mentre l'UFL aumenta.

Limiti di esplosività: Sono analoghi ad i limiti di infiammabilità ma riferiti non più agli inneschi ma alle esplosioni direttamente, dove il limite massimo si denota come UEL ed il minimo come LEL. È anche chiamato intervallo di esplosione (Green & Perry, 2008).

Punto di infiammabilità FP: Il punto di infiammabilità o flash point è la temperatura minima in cui un liquido produce vapore a sufficienza da poter arrivare ad una concentrazione di combustibile che diventi la miscela vapore-aria infiammabile (Green & Perry, 2008), ovvero avventi una pressione di vapore in grado di far raggiungere una concentrazione paragonabile al limite minimo di infiammabilità LFL. Generalmente il FP aumenta con la pressione.

Punto di fuoco o fiamma: Temperatura minima in cui il vapore presente sopra un liquido brucia continuamente dopo di essere stato innescato. Questa temperatura è maggiore rispetto a quella di punto di infiammabilità o di flash, tipicamente tra i 5-15 °F. Questa relazione è utile poiché per alcune sostanze non si trova facilmente il punto di fiamma/fuoco.

Energia minima di accensione MIE: è la proprietà più importante al momento di parlare di innesco forzato di una miscela infiammabile e come il suo nome lo dice è la quantità di energia minima che una sostanza o miscela ha bisogno di guadagnare per poter cominciare il processo di combustione. Tutti i materiali infiammabili, comprese le polveri, hanno un MIE; purtroppo, questo parametro è difficile da relazionare ad altre proprietà fisiche ma esistono delle correlazioni proposte in diversi lavori di ricerca.

La maggior parte dei vapori di idrocarburi hanno un MIE intorno ai 0.25 mJ, mentre per le polveri possono essere di circa 10 mJ. Certamente c'è una variabilità nei valori a seconda della sostanza e le sue proprietà.

Concentrazione limite di ossigeno LOC: Concentrazione minima di ossigeno in cui avviene la combustione. Al di sotto di questa non è possibile avere detto processo indipendentemente della concentrazione di combustibile. Dipende dalla pressione e la temperatura ed ulteriormente dalla presenza di gas inerti.

Pressione di vapore VP: È una proprietà molto importante perché ci dice che tan propenso è un liquido a vaporizzare e quindi nel caso di un rilascio è un fattore che incide nella dimensione della nube di vapore che si formerebbe. La pressione di vapore è fortemente dipendente del materiale stesso e dalla temperatura.

Velocità di combustione fondamentale: La velocità di combustione è la velocità di propagazione della fiamma rispetto al gas incombusto davanti al fronte della fiamma. La velocità di combustione fondamentale è la velocità di combustione di una fiamma laminare in condizioni dichiarate di composizione, temperatura e pressione nel gas incombusto.

Nota: Solitamente è necessario conoscere le proprietà relative alla infiammabilità per miscele di vapori. Alcune possono valutarsi d'accordo alla regola di LeChatelier, tra cui i limiti di infiammabilità,

3.1.2 Proprietà per le polveri

Come detto in precedenza le nubi di polveri esplosive presentano delle proprietà di combustione simili a quelle delle miscele esplosive gassose come ad esempio:

- Limiti di infiammabilità ed esplosività
- Velocità di combustione laminare o fondamentale
- Costanti adiabatici
- Pressioni di esplosione adiabatiche a volume costante
- MIE ben definite
- MIT a condizioni sperimentale date

Ci sono altri fattori che influiscono nella sensitività agli inneschi ed alla violenza delle esplosioni causate dalle loro nuvole. Tra questi si trovano (Eckhoff, 2003):

- La composizione chimica
- La pressione e la temperatura iniziale della fase gas in cui vengono disperse le particelle.
- La distribuzione granulometrica delle particelle ma anche la forma poiché determinano l'area superficiale specifica.
- Il grado di dispersione ed agglomerazione delle particelle che determinano l'area superficiale effettiva.
- La distribuzione della concentrazione nella nuvola.
- Il grado di turbolenza della nuvola.

- La locazione delle fonti di innesco.
- La possibile distorsione delle fiamme, se presenti, per meccanismi diversi alla turbolenza.
- La possibilità di avere la presenza di trasferimento di calore radioattivo, il cui dipende dalla temperatura delle fiamme che possano esserci.

Temperatura minima di ignizione MIT: Temperatura minima che deve avere una superficie calda per far sì che una miscela polvere-aria si inneschi al suo contatto (Ullmann, 2000).

Temperatura minima di ignizione di una nuvola di polvere MIT_c: Temperatura minima di una superficie calda nella quale una miscela infiammabile di polvere ed aria si innesca. Questa si determina per certe condizioni sperimentali specifiche.

Temperatura minima di ignizione di uno strato di polvere MIT_L: Analogamente alla MIT_c è la temperatura minima di una superficie calda nella quale uno strato di polvere si innesca. Dipende dalle condizioni.

Energia minima di accensione MIE: Come già detto per i liquidi, è la quantità di energia minima richiesta in grado di dar inizio ad una reazione di combustione in condizioni di pressione e temperatura atmosferica e varia per ogni sostanza date le loro proprietà.

Classe di esplosione St: Le polveri si catalogano in una classe St specifica d'accordo al valore che prende la loro costante di esplosione massima K_{max}.

Sovrapressione di attivazione P_a: Pressione soglia al di sopra della pressione di innesco nella quale viene applicato un segnale di innesco.

3.2 Analisi dei rischi di ambienti esplosivi

Tornando a quello che è l'analisi e la valutazione dei rischi, la normativa ATEX nello standard EN1127-1 (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION CEN, 2007), fornisce una guida su quali sono gli elementi che si dovrebbero includere al momento di portare avanti tale attività.

- Identificazione dei pericoli. Ad esempio, per questo caso specifico, identificare quali sono le sostanze pericolose e tutti i dati riguardo a essa che abbiano relazione con la sicurezza e l'infiammabilità.
- Determinare se la quantità di sostanza coinvolta è tale da poter formare un'atmosfera esplosiva.
- Determinare la presenza di fonti di innesco che siano in grado di provocare l'innesco dell'atmosfera esplosiva e con quale probabilità.
- Determinare i possibili effetti di un'esplosione.
- Valutare il rischio
- Considerare delle misure per la riduzione del rischio.

Un'altra informazione importante che si riporta, particolarmente negli standard IEC 60079-10-1 e IEC 60079-10-2 (IEC, 2015; IEC, 2015), è la classificazione delle aree pericolose in diverse zone, la cui facilita prendere le decisioni riguardo alle misure di protezione che si devono implementare, poiché ci dà un'idea del livello di pericolosità al cui viene sottoposta la suddetta zona, oltretutto il tipo di sostanza compromessa cioè, gas/vapore o polvere.

Nelle tabelle 3.1 e 3.2 si spiegano quali sono le zone per i vapori infiammabili e quelle per le polveri combustibile, rispettivamente.

Tabella 3.1: Classificazione delle aree di rischio per le sostanze infiammabili

Zona 0	Luogo in cui un'atmosfera esplosiva costituita da una miscela di aria – sostanza infiammabili sotto forma di gas, vapore o nebbia è presente continuamente per lunghi periodi o frequentemente.
Zona 1	Luogo in cui un'atmosfera esplosiva costituita da una miscela di aria – sostanza infiammabili sotto forma di gas, vapore o nebbia può verificarsi occasionalmente durante il normale funzionamento.
Zona 2	Luogo in cui un'atmosfera esplosiva costituita da una miscela di aria – sostanza infiammabili sotto forma di gas, vapore o nebbia non è probabile che si verifichi durante il normale funzionamento ma, se si verifica, persisterà solo per un breve periodo.

Tabella 3.2: Classificazione delle aree di rischio per le polveri combustibili

Zona 20	Luogo in cui un'atmosfera esplosiva, sotto forma di una nuvola di polvere combustibile nell'aria, è presente continuamente per lunghi periodi o frequentemente.
Zona 21	Luogo in cui un'atmosfera esplosiva, sotto forma di una nuvola di polvere combustibile nell'aria, può verificarsi occasionalmente durante il normale funzionamento.
Zona 22	Luogo in cui un'atmosfera esplosiva, sotto forma di una nuvola di polvere combustibile nell'aria, non è probabile che si verifichi durante il normale funzionamento ma, se si verifica, persisterà solo per un breve periodo.

Allo stesso modo, lo Standard IEC 60079-10 (IEC, 2002) propone la classificazione delle apparecchiature soggette ad atmosfere esplosive in diversi gruppi di esplosione. Questi gruppi al contempo hanno delle suddivisioni d'accordo alla natura delle sostanze che danno luogo a gas, vapori e polveri infiammabili, come si fa vedere nella tabella 3.3.

Tabella 3.3: Gruppi di esplosione

Gruppo I	Le apparecchiature destinate all'uso in miniere sensibili al fuoco.	
Gruppo II	Le apparecchiature destinate all'uso in luoghi con atmosfera esplosiva di gas o vapore diversa dalle miniere sensibili al fuoco.	
	Suddivisione IIA	Dove un gas tipico è il propano ed un vapore tipico l'esano.
	Suddivisione IIB	Dove un gas tipico è l'etilene ed un vapore tipico l'etere dietilico.
	Suddivisione IIC	Dove un gas tipico è l'idrogeno ed un vapore tipico il disolfuro di carbonio.

Gruppo III	Le apparecchiature destinate all'uso in luoghi con atmosfera di polvere esplosiva diversa dalle miniere sensibili al fuoco.	
	Suddivisione IIIA	Combustibili volanti
	Suddivisione IIIB	Polveri non conduttive
	Suddivisione IIIC	Polveri conduttive

4. Generalità sugli Inneschi

Per capire il lavoro svolto e l'importanza del medesimo è necessario conoscere la natura degli inneschi, come si sviluppano, i fattori che incidono e come andare ad agire sui rischi legati ad essi.

4.1 Cosa si intende per innesco?

Una delle definizioni più semplice che si può trovare per il termine innesco è data dalla ISO (International Organization for Standardization), come l'inizio di una combustione, ovvero l'inizio di una reazione di ossidazione nata dalla combinazione dei tre elementi fondamentali: il comburente che funziona come fonte di ossigeno, il carburante o combustibile che sarebbe qualsiasi sostanza, sia di natura organica che inorganica, che abbia delle proprietà favorevoli per infiammarsi, e infine una fonte di innesco la cui fornisce l'energia necessaria per raggiungere il limite minimo in cui la sostanza in particolare può dare luogo all'accensione (Center for Chemical Process Safety, s.f.).

L'insieme di questi tre elementi sono conosciuti come il "Triangolo del fuoco" e si applica per tutte le sostanze siano in stato liquido e gas che solido ma per il caso dei liquidi e solidi c'è bisogno che ci sia prima un certo processo, ossia, i liquidi vengono volatilizzati mentre i solidi decomposti poiché la combustione in realtà avviene in fase vapore. Detto questo è importante sottolineare l'importanza di certe proprietà come la volatilità per i liquidi e le dimensioni e distribuzioni delle particelle che disperdono i solidi, così come la loro sospensione in gas (Green & Perry, 2008).

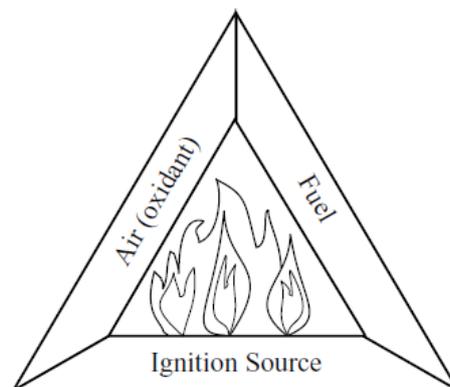


Figura 4.1: Triangolo del fuoco. Preso da (Casal, 2018)

Un'altra definizione interessante è data dalla NFPA (National Fire Protection Association), la cui dichiara anche che sia un processo di ossidazione ma si specifica che questo accade ad una velocità lo sufficientemente elevata da produrre calore e solitamente luce sotto forma di splendore o fiamma.

La CCPS (Center for Chemical Process Safety, s.f.) in base a queste definizioni lo spiega come la transizione repentina ad una reazione di ossidazione ad alta temperatura autosostenuta.

L'innesco si produce quando il calore che si genera supera la quantità di calore dissipato e quindi l'energia che si libera fa sì che la temperatura aumenti. Prima o poi si arriva ad un

punto in cui la temperatura raggiunge un valore nel quale c'è un controllo da parte della diffusione dei reagenti sulla velocità di generazione del calore, instaurandosi uno stato stabile di combustione o decomposizione (Eckhoff, 2003).

L'ignizione o innesco può catalogarsi in due: l'innesco immediato e l'innesco ritardato. La differenza tra di loro può considerarsi più in termini spaziali che temporali (Ronza, et al., 2007). L'innesco Immediato succede quando si trova lo sufficientemente vicino alla fonte di rilascio del materiale infiammabili ed in un tempo così piccolo da non permettere che la nuvola di sostanza raggiunga una concentrazione di vapore tale per cui avvenga un'esplosione (Center for Chemical Process Safety, s.f.). È probabilmente che si sviluppi grazie all'auto innesco della stessa sostanza oppure perché simultaneamente c'è stato un incidente in una qualsiasi fonte di innesco (Changlong, et al., 2012).

L'innesco ritardato si produce dopo che la sostanza si disperde e allontana dal punto stesso dove c'è stata la fuoriuscita, permettendo la formazione di una nuvola di vapore infiammabile prima che avvenga l'innesco vero e proprio (Moosemiller, 2011), e quindi deve raggiungere una fonte di innesco per essere scatenato (Changlong, et al., 2012).

Al parlare di innesco è impossibile non pensare ad altri termini collegati che sono altrettanto importanti, ad esempio incendio ed esplosione. Innanzitutto, bisogna chiarire la distinzione tra innesco ed incendio giacché esiste la possibilità che le persone usino questi due termini di maniera sbagliata o pensino che sia lo stesso. Dunque, l'innesco come si ha già detto è l'inizio del processo di combustione, l'incendio invece è la continuazione di questo processo ma può non essere sempre così, nel senso che ci sono altre situazioni che vengono scatenate dopo l'innesco, come ad esempio le esplosioni.

L'esplosione la si definisce normalmente come il rilascio repentino di una forte onda di pressione o d'urto provocata per una liberazione di energia chimica o meccanica. In questo caso, all'essere collegata agli inneschi, si capisce che è il prodotto di un processo chimico esotermico (Eckhoff, 2003).

Comunque, anche se si potrebbe pensare soltanto a queste due conseguenze, l'incendio e l'esplosione, nella realtà ce ne sono altre distinzioni. Più avanti si fa un elenco di tutte queste.

4.2 Come avviene un innesco?

Ci sono diversi modi in cui può darsi luogo ad un innesco, sia come risultato dell'autoaccensione della sostanza combustibile, dove la propria sostanza fornisce il calore per innescarsi oppure dall'accensione forzata in cui i fattori esterni influiscono ed è necessaria la presenza di un agente che fornisca l'energia (Center for Chemical Process Safety, s.f.).

4.2.1 Auto innesco

L'auto innesco è il risultato dell'autoaccensione del materiale stesso partendo da qualsiasi condizione di temperatura, pressione e volume, in cui la rata di calore che si guadagna è maggiore a quello che si disperde dal sistema (Center for Chemical Process Safety, s.f.). Lo si conosce anche come accensione auto-indotta.

4.2.2 Accensione forzata

L'innesco di una miscela infiammabile è logicamente possibile quando si ha la presenza di una fonte di energia. Questa fonte potrebbe essere una fiamma direttamente, che però deve

soddisfare tre requisiti fondamentali: avere una temperatura minima, una dimensione e forma adeguata ed essere applicata per un certo tempo in maniera che la miscela possa raggiungere il MIE. Altre fonti che possono indurre all'accensione sono la presenza di una superficie calda, una scarica elettrica (Center for Chemical Process Safety, s.f.).

4.3 Conseguenze che si producono

Si potrebbe pensare che un innesco sia soltanto il fatto che un qualunque cosa prenda fuoco ma non è così semplice. L'innesco può provocare diverse situazioni a seconda di molti fattori legati sia alla natura della sostanza come la pericolosità e la fase di stato, ma anche alle condizioni di processo e dell'ambiente in cui succede il rilascio. Ciò fa sì che le conseguenze vadano da una dispersione di materiale tossico, incendi minori con un livello di danno ridotto, fino ad avere delle esplosioni di grandi dimensioni e con un grado di distruzione maggiore.

Detto questo, a continuazione si spiegano le diverse conseguenze che tipicamente possono presentarsi nell'industria le cui sono riassunte negli schemi delle seguenti figure.

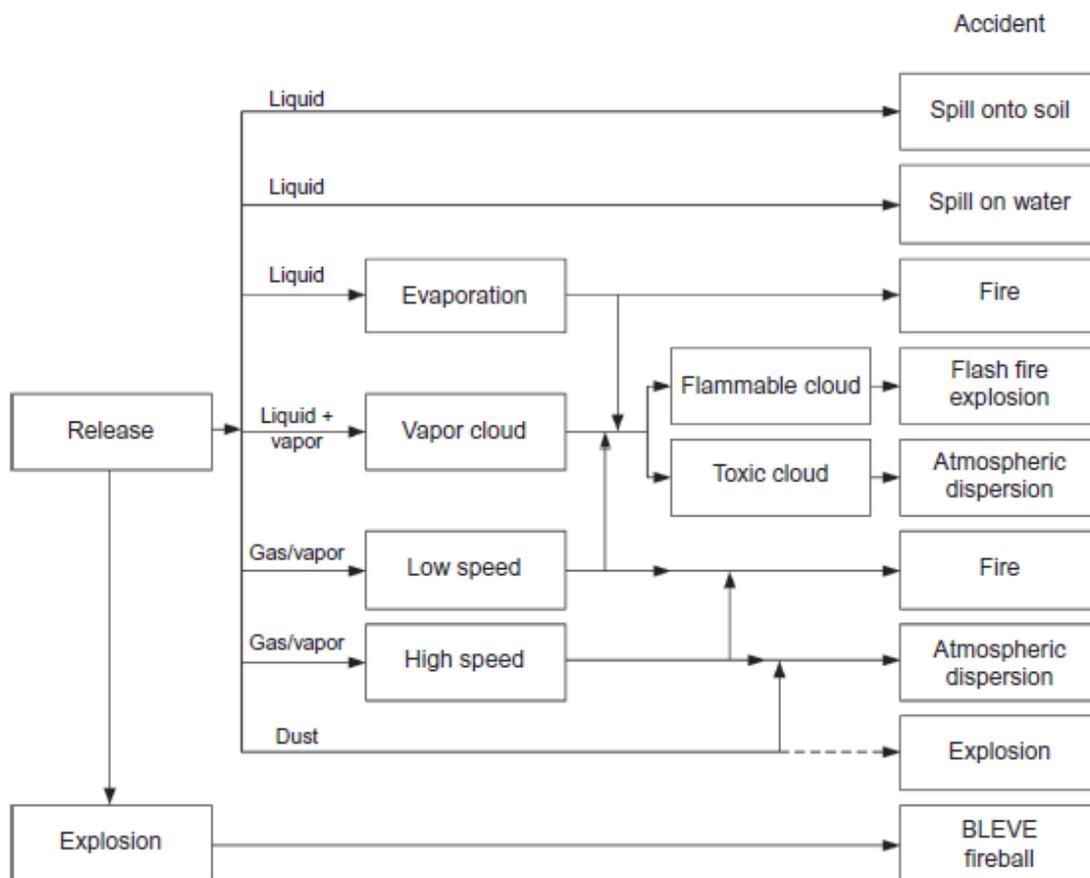


Figura 4.2: Incidenti dopo un rilascio di materiale. Preso da (Casal, 2018)

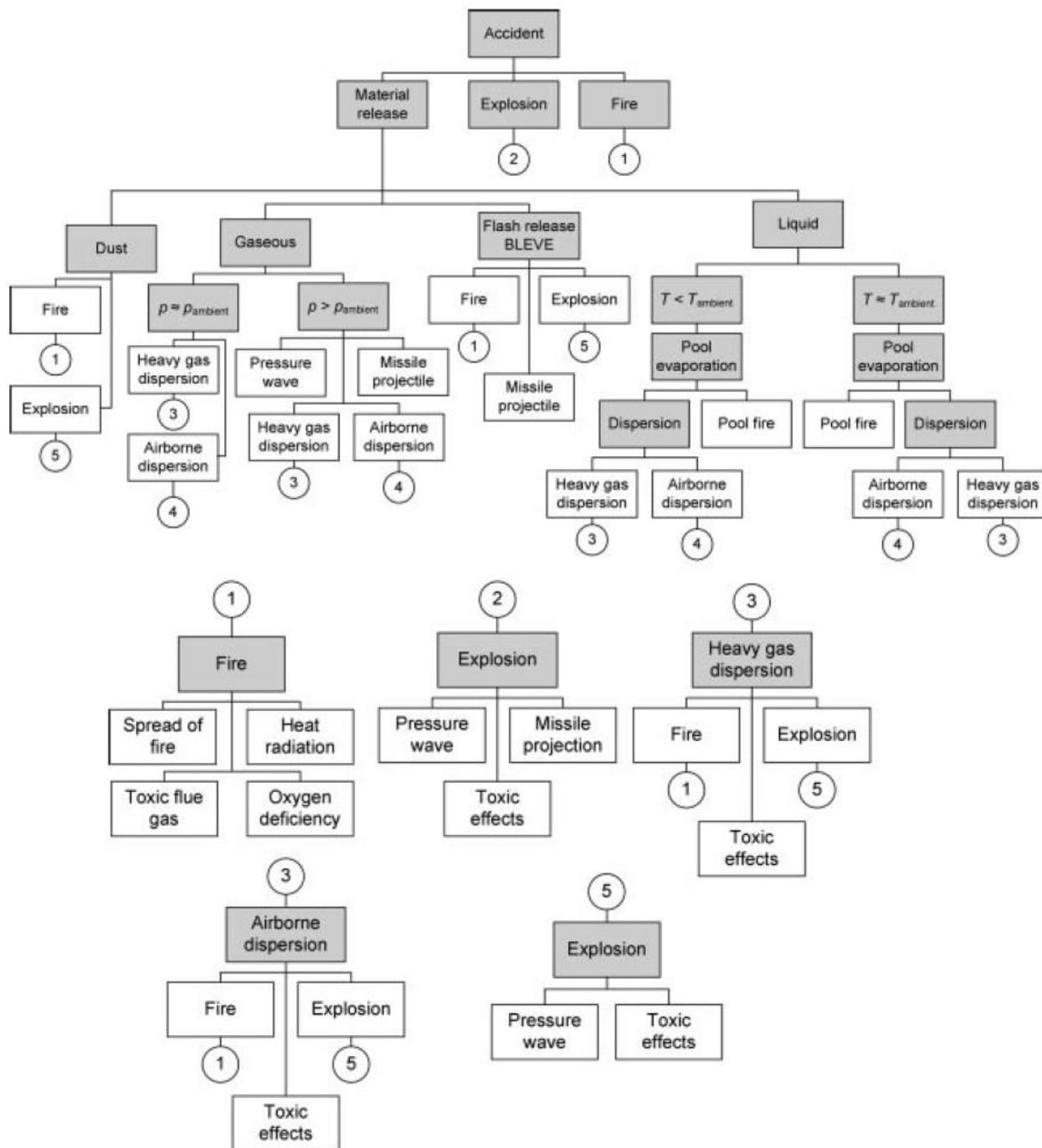


Figura 4.3: Caratteristiche e tipi potenziali di accidenti in impianti di processo. Preso da (Ullmann, 2000)

Inoltre, nelle Figure 4.3 e 4.4 si specificano più in dettaglio i tipi di fuoco ed esplosione che potrebbero presentarsi.

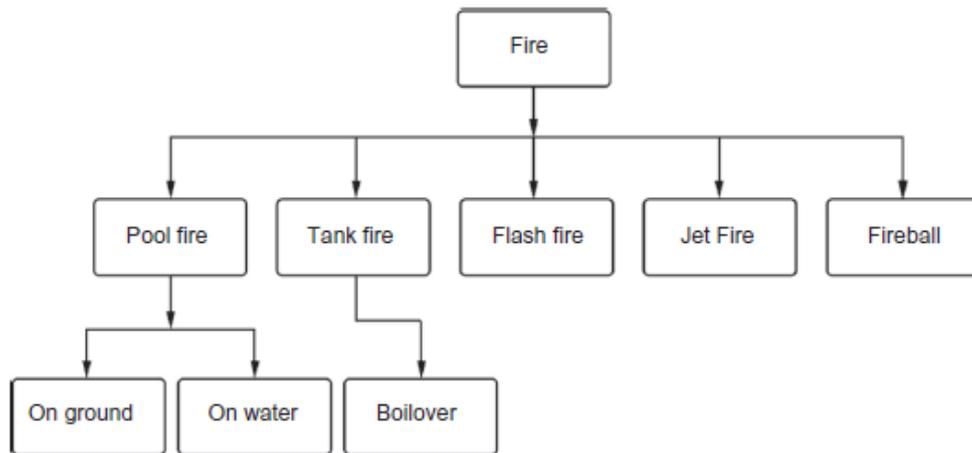


Figura 4.4: Tipi di fuoco. Preso da (Casal, 2018)

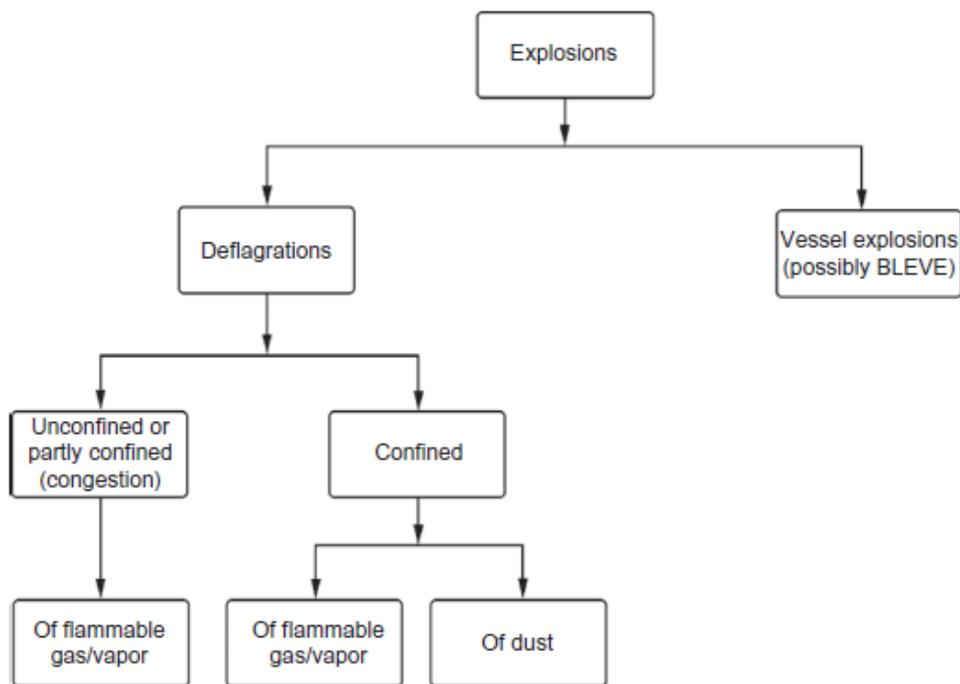


Figura 4.5: Tipi di esplosione. Preso da (Casal, 2018)

4.3.1 Sfera di fuoco (Fireball)

Si produce quando avviene l'innesco di una sostanza gassosa molto infiammabile ma anche gassosa liquefatta, la cui si ha in stoccaggio sotto pressione. La durata di questo tipo di fuoco varia tra 5 e 20 secondi e la sua intensità in termini di grandezza (raggio) dipende dalla quantità immagazzinata (Jafari, et al., 2018). Si specifica però che durante il loro stoccaggio non si ha la presenza di ossigeno per far avvenire la combustione, per cui è associato ad un'esplosione previa del serbatoio che contiene la sostanza.

4.3.2 Fuoco da pozza (Pool fire)

Quando c'è uno stoccaggio di liquido infiammabile in un contenitore aperto che appunto lo si potrebbe associare ad una piscina, c'è la possibilità che si inneschi. In questa situazione

quello che brucia è la superficie esposta all'ambiente, per cui l'intensità di questa conseguenza dipende dall'area superficiale (m^2) della piscina, la quantità stoccata e certamente il tipo di liquido (Jafari, et al., 2018). C'è da dire che esiste la possibilità che si sviluppi fuoco di pozza anche nei casi in cui un liquido infiammabile ed immiscibile sia rovesciato in acqua. La combustione in questi casi è povera producendo una grande quantità di fumo nero che si disperde nell'aria.

4.3.3 Getto di fuoco (Jet fire)

Accade quando si ha un rilascio di idrocarburi pressurizzati e provoca fiamme incidenti con un momento significativo. La forza di queste fiamme varia con la pressione di stoccaggio degli idrocarburi, la quantità e anche del diametro del foro di rilascio (Jafari, et al., 2018). In altre parole, il getto di fuoco si distingue da quello di pozza dalla turbolenza della diffusione, essendo questo tipo più efficiente grazie al miglioramento della combustione.

4.3.4 Incendio serbatoio (Tank fire)

Analogamente al fuoco da pozza ma con la differenza che avviene normalmente in un serbatoio cilindrico e quindi le fiamme prodotte si localizzano ad una certa altura al di sopra del piano terra, contrario al fuoco di pozza che in genere si situa allo stesso livello.

4.3.5 Fuoco istantaneo (Flash fire)

Si producono di maniera repentina e intensa e le fiamme vengono propagate dalle miscele aria – vapore/gas infiammabile che si trova nei suoi limiti di infiammabilità. Dipendono allora dalla dispersione delle sostanze nell'atmosfera e anche delle condizioni meteorologiche.

4.3.6 Esplosione di nube di vapore VCE

Esplosione che avviene quando si crea una nuvola ad alta concentrazione di vapore infiammabile la cui raggiunge una scintilla, rilasciando allora l'energia contenuta. È importante dire che in questi tipi di esplosioni, la principale causa di danno non sono le fiamme che possano propagarsi ma la sovrappressione che crea l'onda esplosiva (Jafari, et al., 2018).

Ci sono delle variabili che determinano la possibilità che accada o meno l'esplosione, tra cui la velocità di combustione fondamentale, il grado di congestione ed il grado di confinamento dello spazio in cui avviene il rilascio di sostanza. Tutte e tre variabili sono direttamente proporzionali alla probabilità di accadimento dell'esplosione (Center for Chemical Process Safety, s.f.).

4.3.7 Esplosione di nube di vapore confinato:

È analoga alla VCE ma se avviene in uno spazio confinato.

4.3.8 Esplosione del vapore di liquido in ebollizione BLEVE

BLEVE ovvero Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion, è un tipo di esplosione che avviene subito dopo che un serbatoio contenente liquido ad una temperatura maggiore al suo

punto di ebollizione cede dovuto ad un aumento repentino nella pressione di stoccaggio (Jafari, et al., 2018).

4.3.9 Dispersione (Rilascio di materiale tossico)

Quando si ha un rilascio accidentale di sostanze può succedere che questa oltre ad essere infiammabile sia tossica. In alcuni casi la quantità emessa non è tale da raggiungere la soglia minima per innescarsi ma comunque si disperde nell'ambiente per cui è una conseguenza di impatto negativo tenendo conto la sua tossicità.

4.3.10 Detonazione

Anche se in genere non si tiene conto di questa conseguenza, la detonazione di una miscela infiammabile è possibile e può darsi sia indirettamente che direttamente. Indirettamente si deve alla transizione da deflagrazione a detonazione o DDT (Deflagration to detonation transition) la cui base è una combustione non uniforme che provoca delle onde instabili che si accumulano fino alla formazione di una grande onda di urto. ma anche di maniera diretta grazie ad una forte fonte di innesco, cioè che produca una quantità di energia esageratamente alta dell'ordine di mille di Joules in confronto con una tipica ignizione dove basta 1 mJ per avere luogo.

4.3.11 Esplosione di Polvere

Ci sono delle sostanze in stato solido che, quando si trovano in particolato molto fino e vengono dispersi nell'ambiente ad alte concentrazioni, subiscono delle combustioni violente provocando delle esplosioni di alto impatto. Tra le più diffuse si trovano lo zucchero, la farina, l'alluminio, il carbone, ecc.

I parametri controllanti sono specialmente le dimensioni delle particelle, la concentrazione nell'aria ed il grado di confinamento, per cui è piuttosto complesso sviluppare dei modelli per queste esplosioni (Casal, 2018).

4.4 Fonti degli inneschi

Per cominciare il processo di combustione, in generale, è necessaria la presenza di un fattore esterno che fornisca l'energia minima che il combustibile ha bisogno. Ci sono degli oggetti o contesti comunemente presenti negli ambienti industriali ma che non si pensa che possano agire come fonte di innesco. Questo è di gran rilevanza nel momento di fare una valutazione dei rischi poiché potrebbero sfuggire e quindi portare a risultati sbagliati, conferendo un rischio minore a quello che realmente sarebbe.

Facendo una classifica generale delle fonti di innesco si ha secondo la CCPS (Center for Chemical Process Safety, s.f.):

- Fonti termiche o di temperatura moderata che possano dare luogo all'accensione spontanee di alcune sostanze
- Fonti elettriche come apparecchiature, accumulazione elettrostatica, correnti vaganti, radiofrequenze e luci.
- Fonti fisiche tra cui energie provenienti dalla compressione, calore di adsorbimento, frizione ed impatto.

- Fonti chimiche come sostanze catalitiche, piroforiche e innestabili.

Andando ad essere più specifici, nella seguente tabella presente nel Manuale dell'Ingegnere Chimico (Green & Perry, 2008) si fa un elenco più al dettaglio delle principali fonti di innesco.

Tabella 4.1: Principali fonti di innesco

Tipo di Fonte	Presenza nei processi
Elettriche (circuiti di motori)	23%
Sigarette	18%
Frizione (pezzi rotti)	10
Materiale surriscaldato (Temperature anomale)	8%
Superficie calde	7%
Fiamma del bruciatore	7%
Scintille di combustione	5%
Innesco spontaneo	4%
Taglio e saldatura	4%
Esposizione (a fiamme)	3%
Incendiari (Malintenzionato)	3%
Scintille meccaniche (macinino)	2%
Sostanze fuse (Fuoriuscite calde)	2%
Azione chimica (Processo)	1%
Scintille statiche (Rilascio di energia accumulata)	1%
Fulmini (dove non ci sono parafulmini)	1%
Altri vari	1%

4.4.1 Frizione

È un processo di lunga durata, dove due oggetti si strofinano uno contro l'altro provocando così un riscaldamento delle superficie ma anche l'usura dei materiali e quindi possibili rilasci di particolato.

4.4.2 Impatto meccanico

Quando c'è un'interazione di breve durata tra corpi solidi, specialmente di natura metallica, esiste la possibilità che qualche frammento piccolo si stacchi e grazie all'assorbimento di energia dall'impatto stesso può cominciare a bruciare. Tale situazione indubbiamente si considera una fonte di innesco (Eckhoff, 2003).

Bisogna però, fare attenzione e distinguere tra l'impatto e la frizione, poiché sono due processi diversi che si tendono a raggruppare e riferire come situazioni analoghe.

4.4.3 Superficie calde

La presenza di superficie calde è una delle principali fonti di innesco, sia per le sostanze liquide e vapore che per le nuvole di polveri. Il contatto diretto tra la superficie e la sostanza è in grado di fornire l'energia per dare luogo all'innesco. Certamente, si considerano quelle superficie avventi delle temperature sufficientemente alte.

4.4.4 Taglio e saldatura

Le scintille prodotte dai processi di taglio e saldatura di metalli possono essere lo sufficientemente potenti da iniziare una combustione o esplosione di nuvole di polvere. In particolare, le fiamme che si producono dal taglio sono molto pericolose perché forniscono un eccesso di ossigeno nella zona di lavoro; questo, per quanto riguarda alle polveri può far sì che la sensibilità all'innescò e la violenza delle esplosioni sia maggiore.

4.4.5 Cariche elettrostatiche o scintille statiche

Ci sono diversi tipi di scariche statiche, a continuazione si fa una breve descrizione di esse.

Scarico di corona: Accade quando si ha la presenza di punti acuti in prossimità di superfici cariche, provocando una ionizzazione dell'aria. A partire da questo tipo di fonte si ha l'innescò solo di sostanze chimiche fortemente sensibili.

Scarico di cespuglio (Brush): In questo caso un oggetto che fa di elettrodo, avente una forma curva di raggio tipico tra 5 e 50 mm, produce una scarica quando è in contatto con una superficie carica non conduttrice come plastica, polvere, ecc. Lo scarico ottenuto possiede una quantità di energia maggiore rispetto allo scarico di tipo corona.

Scarico di bulk di cespuglio: È importante quando si hanno delle sostanze solide, poiché è associato all'accumulo di polvere. Può succedere quando si versa della polvere nell'interno di un gran contenitore o silo; le particelle cariche si accumulano dentro il contenitore favorendo la generazione di un'elevata densità di carica (Eckhoff, 2003).

Scarico di propagazione di cespuglio (Propagating brush discharge): Avviene quando si ha una superficie con un'elevata densità di carica supportata da un conduttore a terra consentendo così al campo elettrico di esistere tra la superficie ed il supporto invece che nell'aria dove normalmente si disperderebbe. In altre parole, si ha la presenza di due strati con cariche di polarità contraria consentendo l'accumulo di un'alta densità di carica.

Scarico di scintilla o capacitore (spark discharge): Quando si ha la presenza di materiale capacitivo è molto probabile che ci siano delle scintille, specialmente quando non è ben connesso a terra. Questo è il principale tipo di scarico elettrico che interessa nell'innescò di sostanze infiammabili già che molti degli oggetti presenti in un impianto hanno la capacità di accumulare cariche elettriche e quindi funzionare come condensatori.

4.5 Fattori che incidono nella probabilità di innescò

La probabilità si stima tenendo conto la frequenza con cui si deriva e propaga una nuvola di gas infiammabile che incontra una fonte di innescò. Ci sono tanti fattori che incidono tanto sulla creazione di questa nuvola come con la propagazione della medesima. Dello stesso modo però, ci sono degli aspetti rilevanti con rispetto allo scenario in cui avviene l'incidente che determinano la probabilità.

4.5.1 Fattori relativi alle sostanze

Sostanza rilasciata: Logicamente più volatile e infiammabile la sostanza, più alta sarà la probabilità di creare una nuvola di vapore, raggiungere delle concentrazioni sufficienti per diventare pericolose ed infine di innescarsi (Ronza, et al., 2007).

Proprietà delle sostanze/miscele: Oltre alla volatilità ci sono delle proprietà che favoriscono le condizioni per raggiungere l'innesco, tra cui l'IT, l'AIT, il MIE, il FPT, il VP ed i limiti LFL – UFL.

Fase di rilascio: Per essere possibile l'innesco è importante che la miscela abbia l'accesso all'ossigeno necessario. Per questo è indispensabile che il rilascio sia in fase vapore, si formi facilmente il vapore, o sia lo sufficientemente atomizzato da poter comportarsi come vapore. Nonostante questo, quando esiste la presenza di bolle di liquido o particolato solido nella fase gas, sia perché nella miscela si abbia la presenza di queste oppure perché si siano formati durante il rilascio, potrebbe accadere che si accumulino delle cariche statiche che vadano a far innescare il vapore, quindi è più probabile che accada questo tipo di innesco quando si rilasciano delle miscele polifasiche.

4.5.2 Fattori relativi alla fonte di rilascio

Portata o quantità di rilascio: Com'è da aspettarsi la portata è un fattore che incide direttamente sulla possibilità di accadimento di un innesco, visto che a maggiore portata, ovvero maggiore quantità di sostanza rilasciata, maggiore è la dimensione di nube infiammabile e quindi è più probabile che questa raggiunga una fonte di innesco, ma della stessa maniera è possibile che si raggiunga una concentrazione maggiore tale per cui, anche in assenza di una fonte di innesco, ci sia la possibilità di autoaccensione della miscela.

Pressione di rilascio: La pressione è legata alla velocità di rilascio della sostanza e quindi anche alla formazione di cariche statiche, poiché quanto maggiore sia la pressione maggiore sarà la velocità di fuoriuscita. Nel caso di liquidi allora, di conseguenza ci sarà una maggiore dispersione e formazione di bolle di piccola dimensione, ovvero una nebulizzazione del liquido favorendo così l'accumulo di cariche elettriche.

Temperatura di rilascio: Quando si parla di inneschi, la temperatura è una variabile che di per sé si considera tra le più importanti. Questa influenza diverse proprietà intrinseche delle sostanze come ad esempio il limite di infiammabilità, oppure la tendenza di vaporizzazione in un rilascio liquido o bifasico.

Durata: Intuitivamente si sa che la durata del rilascio di sostanza aumenta la probabilità di innesco. A maggior tempo trascorso si aspetta che la quantità di sostanza sia maggiore visto che si dà la possibilità di raggiungere una concentrazione maggiore ma anche delle dimensioni tale per cui, anche essendo lontane le fonti di innesco, la nube di sostanza sia in grado di raggiungerle.

Presenza di cariche statiche: Il luogo in cui avviene un rilascio accidentale di sostanze infiammabili ha una criticità elevata, specialmente al momento di determinare se avviene un innesco immediato, dovuto alla presenza o meno di fonti di innesco, in questo caso statiche.

Restrizioni nel punto di rilascio: La presenza o meno di ostruzioni o confinamenti può influenzare la probabilità di innesco dal fatto che incide sulla pressione di rilascio.

4.5.3 Fattori relativi all'ambiente esterno

Caratteristiche dei dintorni: Le caratteristiche in generale del luogo dove si produce un incidente gioca un ruolo importante nel determinare che tanto possibile sia finire in una situazione di incendio/esplosione (Ronza, et al., 2007).

Presenza di fiamme: Naturalmente la presenza di una fiamma fin dall'inizio è una fonte imminente di calore, la cui fornirà l'energia per portare avanti l'innesco nel caso in cui si abbia un rilascio di sostanza infiammabile.

Particelle che bruciano e scintille: L'energia contenente in alcune particelle e scintille può essere sufficientemente grande da provocare l'innesco di una miscela infiammabile.

Apparecchiature elettriche: Queste apparecchiature hanno circuiti e linee di potere dove viaggia l'energia, essendo chiaramente una fonte che può fornire sufficiente energia per l'innesco. Il fatto che si dia luogo all'accensione dipende dalla tensione e la corrente che si stia trasmettendo.

Superfici calde: Sono una fonte diretta di calore grazie alla convezione tra la superficie e l'ambiente. Tuttavia, hanno una forza minore in confronto con le altre fonti di calore (fiamme, scintille, apparecchiature).

Scarico in uno spazio aperto o chiuso: L'ambiente propriamente è un fattore che favorisce o meno la probabilità che si abbia un innesco. Logicamente quando succede in un posto al chiuso è più possibile che grazie al confinamento dei vapori si raggiunga una concentrazione minima per l'accensione, mentre che all'aperto si disperde la nuvola. C'è da dire però che ci possono essere delle situazioni in cui al chiuso si raggiunga una concentrazione tale da superare il limite superiore di infiammabilità e quindi non avvenga l'accensione, ma anche c'è più possibilità di esplosione grazie al confinamento dei vapori.

Fonti elettrostatiche umane: Il corpo umano è in grado di accumulare delle cariche elettriche e quindi giocare il ruolo di fonte di innesco elettrostatico. Infatti, ci sono delle ricerche correlate in cui si ha trovato che delle miscele contenenti aria-vapore con un'energia minima di accensione, MIE di 5 mJ o al di sotto, potrebbe essere facilmente innescata da una persona e si ha proposto anche che l'essere umano è in grado di provocare degli scarichi statici di circa 10-30 mJ.

4.6 Controllo delle fonti di innesco

Ci sono due tipi di azioni che si potrebbero applicare con lo scopo di ridurre un rischio. Le azioni preventive che vanno ad incidere direttamente sulla probabilità e le azioni correttive o protettive che attuano quando è già accaduto l'incidente. Nel caso del controllo o riduzione della probabilità di innesco si hanno due tipi di interventi che si potrebbero vedere come preventivo e protettivo.

Come sarebbe da aspettarsi, la gestione ed il controllo delle fonti di innesco presenti in un impianto, lo si deve fare tramite l'implementazione delle normative disponibili per la protezione di incendi dove si introducono e propongono come prima azione una adeguata classifica delle diverse aree di lavoro a seconda della loro pericolosità, con lo scopo di poter, in seguito, andare a decidere delle misure per ridurre i determinati rischi in ciascuna.

4.6.1 Classificazione delle aree pericolose

In generale le grandi industrie chimiche, specialmente petrochimiche, sono state progettate in base a una e anche più di una normativa per regolare la presenza o meno delle diverse fonti di innesco in un'area determinata a seconda del tipo di processo, sostanza, ed in genere del tipo di ambiente che possa aspettarsi di essere esposto.

Come visto nel capitolo precedente, nella normativa standard ATEX le aree pericolose sono state classificate in zone con diversa entità di pericolo, questa classificazione è di gran utilità poiché determina quali sono i tipi di apparecchiature che possono essere presenti in quel spazio, e le misure protettive da applicarsi per ridurre i rischi.

4.6.2 Limitare i veicoli

La presenza o meno di veicoli nelle zone di processo sono state nella storia, uno dei motivi di inneschi. Questo dovuto al fatto che la nuvola di gas di sostanza rilasciata può raggiungere il sistema di combustione dei veicoli, oppure questi possono giocare il ruolo di fonte per la presenza di superfici ad altissima temperatura.

4.6.3 Controllo delle fonti elettriche

È importante avere un controllo sulle diverse fonti di tipo elettrico poiché la loro presenza in alcuni casi è praticamente un obbligo. Prevedere che ci sia la presenza di linee elettriche, di accumulo di cariche addirittura dalle proprie sostanze nel caso di alcuni idrocarburi ma anche delle persone stesse, e quindi gestirle con delle corrette messe a terra è necessario per la sicurezza.

Un'altra azione che a volte non si tiene in conto ma che aiuta a diminuire il rischio quando si parla di fonti elettriche, è assicurare un ambiente con una umidità bassa che non supero certa soglia, ad esempio il 60 %, poiché logicamente la presenza di vapore di acqua all'insieme può di per sé attivare una situazione di pericolo ed aggravare ulteriormente i rischi.

4.6.4 Minimizzare il rilascio

Tenere sotto controllo le fonti di innesco è importante ma logicamente questo non basta se non si attua direttamente sul problema, il rilascio di sostanza. È quindi fondamentale, nel momento in cui accade un incidente di questo tipo, andare ad agire sulle sostanze vere e proprie.

Ci sono diversi metodi conosciuti per diminuire o contenere la quantità di sostanza emessa o almeno ridurre il suo potenziale di innesco. Si può andare ad agire attraverso l'applicazione delle sostanze come acqua, schiuma o nebbia che funzionino di blocco o agenti di soppressione oppure fornire l'area o l'apparecchiatura con sistemi di isolamento o contenzione.

5. Incidenti storici

Avere una conoscenza minima sugli incidenti che sono accaduti lungo la storia è importante sia per i professionali che eseguono delle valutazioni dei rischi, sia per tutti gli addetti che lavorano nell'industria. Questa conoscenza, oltre al fatto che può far capire come non devono condursi i processi, permette di sviluppare una consapevolezza riguardo alla sicurezza non solo del processo in sé, ma di tutto ciò che comporta un'attività e soprattutto delle persone che sono coinvolte diretta e indirettamente ai pericoli.

Un altro aspetto importante da sottolineare è il fatto che grazie allo studio degli incidenti di maggiore dimensione ed impatto, con il tempo, si sono venuti sviluppati diverse procedure, norme, organismi e tutto quanto con lo scopo di procurare che la sicurezza dei processi sia non più una scelta ma un obbligo da garantire.

Innanzitutto, il termine "sicurezza del processo" viene definito in seguito ad alcuni incidenti che hanno lasciato un segno nella storia, come lo sono: Flixborough, Regno Unito nel 1974; Seveso, Italia nel 1976; Bhopal, India nel 1984 e Piper Alpha, Regno Unito nel 1988 (Khan, et al., 2015).

I gravi incidenti che si sono verificati in quel periodo sono stati la principale motivazione per istituire organizzazioni e programmi di ricerca. Come chiaro esempio si ha che posteriore all'incidente di Bhopal, l'American Institute of Chemical Engineers (AIChE) ha formato il Center of Chemical Process Safety (CCPS) per sviluppare le linee guida, le metodologie, gli standard e le pratiche di lavoro sicure per le industrie dei processi chimici. Allo stesso modo, è stato il governo del Regno Unito che dopo Flixborough ha introdotto il "Health and Safety at Work etc. Act 1974" per proteggere e garantire la salute e la sicurezza delle persone sul lavoro. Dopodiché è stata istituita la Commissione per la salute e la sicurezza e successivamente la Direzione della salute e della sicurezza (HSE).

Inoltre, anche le principali normative o disposizioni legislative sono state sviluppate come conseguenza di incidenti di processi importanti. La direttiva Seveso è stata istituita nel 1982 dalla Commissione Europea in risposta all'incidente catastrofico avvenuto in un impianto chimico a Seveso, Italia nel 1976. Nel 1996, la direttiva Seveso è stata sostituita dalla direttiva Seveso II adottando il controllo del regolamento COMAH (Control of Major Accident Hazards) approvato nel 1984 nel Regno Unito.

Tralasciando quello che sono le direttive, organismi, ecc. e concentrando l'attenzione su quello che sono gli incidenti e le sue cause, come primo sguardo si elenca nella tabella 5.1 alcuni dei più impatto ed incidenza sullo sviluppo della sicurezza di processi, in diverse aree industriali.

Tabella 5.1: Incidenti rilevanti (Swuste, et al., 2015)

Industrie ad alto rischio	Periodo	
	1970s – 1980s	2000 – 2010
Nucleare	Chernobyl, 1986	Fukushima, 2011
Estrazione offshore	Piper Alpha, 1988	Deepwater Horizon, 2010
Stoccaggio di combustibile	Port Edouard Heriot, 1987	Buncefield, 2005

Aerospaziale	Challenger, 1986	Columbia, 2003
Aviazione	Tenerife, 1977	Rio Paris, 2009
Chimico – Petrochimico	Flixborough, 1976; Bhopal, 1984	Toulouse, 2001; Texas City, 2005
Ferroviario	Clapham Junction, 1987	Ladbroke grove, 1999
Marittimo I	Zeebruffe, 1987	Costa Concordia, 2012
Marittimo II	Exxon Valdez, 1987	Erika, 2003
Trasporto aereo	Zagreb, 1976	Umberlingen, 2002

Esistono delle diverse banche dati dove è possibile consultare dei report fatti per tanti incidenti industriali, nei cui si specifica sia le cause, conseguenze, tipo di operazione, le azioni da intraprendere e addirittura le lezioni che si sono imparate dopo quell'evento. Una delle più completa è quella della CCPS, chiamata Process Safety Incident Database, PSID. Lì si trovano una gran quantità di incidenti sia di maggiore che minore rilevanza.

6. Modelli per calcolare la Probabilità di Innesco delle Sostanze Infiammabili

Il calcolo della probabilità di accadimento di un incidente è uno step complesso da determinare perché non sempre si hanno a disposizione degli strumenti per calcolarli affidabilmente. In particolare, per l'innescò di sostanze infiammabili ci sono tanti fattori che possono influire nell'effettivo innesco o meno per cui bisogna avere delle procedure che tengano in conto tutti questi fattori.

A continuazione si riportano i modelli trovati nella letteratura per tale scopo.

6.1 CCPS (Center for Chemical Process Safety)

Nel libro *Guidelines for Determining the Probability of Ignition of a Released Flammable Mass* (CCPS Center for Chemical Process Safety, 2014) pubblicato nell'anno 2014, la CCPS intende fornire uno strumento che possa essere utilizzato nell'estima della probabilità di innesco delle sostanze infiammabili, proponendo degli algoritmi sviluppati sulla base dello studio di modelli già presenti da diversi autori, accademici ed industrie.

La rappresentazione più semplice dell'albero degli eventi proposta per il rilascio di una miscela infiammabile che si fa vedere nella Figura 6.1 è proposto per la CCPS

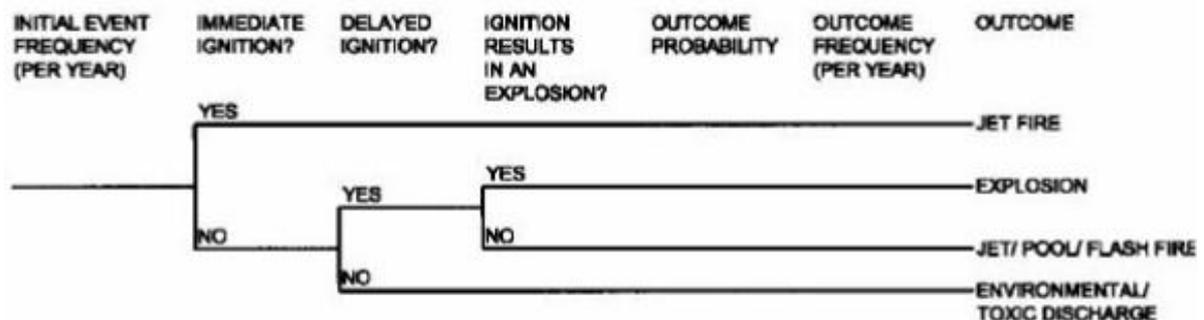


Figura 6.1: Albero degli eventi. Preso da (CCPS Center for Chemical Process Safety, 2014)

È possibile modificare detta rappresentazione e aggiungere più bracci per includere altre situazioni che possano scatenarsi come la detonazione, la esplosione di nuvola di vapore, ecc.; ma anche si potrebbero tenere conto dentro di questo schema i sistemi di protezione presenti e attivi che siano sensibili al fallimento.

Gli algoritmi proposti vanno a seguire l'albero schematizzato in precedenza e presentano tre livelli di raffinatezza in maniera che possa essere applicata in situazioni dove si ha bisogno di un alto grado di accuratezza così come in quelle dove si cerca solo un'estima più grossolana ma comunque con un minimo livello di obiettività.

I 3 livelli che si propongono sono i seguenti:

- Analisi di livello 1 o basico: Si può impiegare adeguatamente nelle analisi dei rischi con delle matrici di rischio e PHA (Process Hazard Analysis), ed è anche

possibile essere applicato in alcuni casi per LOPAs (Layer of Protection Analysis) e FMECAs (Failure Mode, Effects & Criticality Analysis).

- Analisi di livello 2 o intermedio: È adatto per applicare nelle metodologie con PHAs, FMECAs e nelle analisi di rischio quantitativo QRA in fase di identificazione.
- Analisi di livello 3 o avanzato: Idoneo nel caso di un'analisi QRA (Quantitative Risk Analysis), studi costo-beneficio e di conseguenza dettagliata in cui si stima la frequenza.

Per ogni livello di accuratezza sono proposti degli algoritmi per l'innescò immediato, l'innescò ritardato e anche per le esplosioni, i cui dipendono da diversi fattori come le condizioni di processo, il materiale rilasciato, le fonti di innescò, ecc. Nella Tabella 6.1 si specificano le variabili che intervengono in ogni livello per ciascun tipo di conseguenza.

Tabella 6.1: Variabili utilizzate in ciascun livello

Conseguenza	Variabile	Livello
Innesco Immediato	Temperatura di Processo, T	1,2,3
	Temperatura di Autoignizione, AIT	1,2,3
	Pressione di Processo, P	2,3
	Energia Minima di Innesco, MIE	2,3
Innesco ritardato	Rilascio Interno o Esterno	1,2,3
	Energia Minima di Innesco, MIE o Materiale Rilasciato	1,2,3
	Forza della Fonte di Innesco, S	2,3
	Durata del Rilascio	2,3
	Magnitudine del Rilascio	2,3
	Temperatura e Punto di Ebollizione Normale	2,3
	Controllo delle Fonti di Innesco	3
	Ventilazione e Rilevamento	3
	Imnfluenza dell'uomo	3
	Attenuazione	3

6.1.1 Algoritmi di Livello 1

Come già detto, gli algoritmi dipendono del tipo di conseguenza, per cui ci saranno degli algoritmi per calcolare la probabilità di innescò immediato, ritardato e anche di esplosione. Inoltre, siccome dipendono da diversi fattori, ci saranno dei singoli contributi che poi verranno raggruppati per ottenere un singolo valore di probabilità.

1.1.1.1. Probabilità di Innesco Immediato POII

Per questo tipo di innescò, il primo livello prevede due contributi dove sono coinvolti le temperature di processo e di autoignizione.

Contributo per l'innescò statico: Nella letteratura si trova che un valore tipico per questo contributo potrebbe essere intorno ai 0.05. Per avere un valore più accurato sarebbe necessario tenere conto di altre variabili che per lo scopo del livello 1 sono imprescindibili, per cui si assume un valore di 0.05.

Contributo dell'autoignizione: Per quanto riguarda questo contributo, l'espressione sviluppata dipende dalla relazione tra la temperatura di processo e la temperatura di Autoignizione (AIT). Nelle equazioni 6.1 alle 6.3 si definiscono i valori assunti tenendo presente che le temperature devono essere in gradi Fahrenheit (°F).

$$T/AIT < 0.9 \quad \therefore P_{ai} = 0 \quad (6.1)$$

$$T/AIT > 1.2 \quad \therefore P_{ai} = 1 \quad (6.2)$$

$$0.9 < T/AIT < 1.2 \quad \therefore P_{ai} = 1 - 5.000 \cdot e^{[-9.5 \cdot (T/AIT)]} \quad (6.3)$$

Per materiali piroforici si fissa un valore di P_{ai} pari ad 1.

Algoritmo finale per il POII: Mettendo insieme i due contributi e tenendo conto dell'interazione tra di loro, si definisce nella relazione 6.4 la probabilità di innesco immediato per il livello 1 come:

$$POII_{Livello\ 1} = 0.05 + (1 - 0.05) \cdot P_{ai} \quad (6.4)$$

Per il valore di POII si ha però una restrizione; questo può prendere un valore massimo di 0.99 al fine di considerare anche la porzione di probabilità di PODI che si trova nell'albero degli eventi.

1.1.1.2. Probabilità di Innesco Ritardato PODI

Nell'innesco ritardato si suggeriscono altri due fattori importanti anche se potrebbero essere un po' impercettibili in paragone con quelli del POII. Questi due sono il materiale che viene rilasciato e l'area in cui avviene l'incidente, cioè in uno spazio chiuso oppure aperto.

Contributo per il materiale rilasciato: La maniera più diretta di tenere conto il materiale è attraverso le sue proprietà. In questo caso si utilizza l'Energia Minima di accensione o MIE, proponendosi allora la relazione 6.5:

$$PODI_{Livello\ 1} = 0.15 - 0.25 \cdot \log(MIE) \quad (6.5)$$

Il MIE viene espresso in mJ e si stabilisce un valore predefinito di 0.2 mJ nei casi in cui non si tenga conoscenza del MIE della sostanza/miscela. Questo valore deriva dal fatto che il valore massimo di PODI per un rilascio che avviene all'esterno si stima di essere 0.25.

Contributo per il luogo del rilascio: Se l'incidente avviene in un posto chiuso è da aspettarsi che ci sia più probabilità di trovare una fonte di innesco, nonché si raggiunga più facilmente la concentrazione minima a cui possa generare un incendio. Allora, il valore trovato dalla equazione 6.5 lo si moltiplica per il seguente fattore:

$$M_{IN/OUT} = 1.5 \quad \text{Rilascio all'interno} \quad (6.6)$$

$$M_{IN/OUT} = 1 \quad \text{Rilascio all'esterno} \quad (6.7)$$

Algoritmo finale per PODI: La probabilità di innesco ritardato si calcola come:

$$PODI_{Livello\ 1-Tot} = PODI_{S/D} \cdot M_{IN/OUT} \quad (6.8)$$

Il valore di PODI può essere preso massimo di 0.9.

1.1.1.3. Probabilità di Esplosione dato un innesco ritardato

I modelli proposti per la probabilità di esplosione coinvolgono dei fattori che per questo livello di base non è necessario tenere conto, per cui si applicano nel secondo e terzo livello. Allora come prima approssimazione si consiglia un valore specifico di 0.3 ma bisogna fare attenzione perché tutte le situazioni sono diverse e questo valore può non essere coerente sempre.

6.1.2 Algoritmi di Livello 2

I modelli di secondo livello hanno una difficoltà più elevata in quanto si tengono conto più fattori, ottenendosi un valore più affidabile specialmente per i casi in cui si fa una valutazione di rischi quantitativa.

1.1.1.4. Probabilità di Innesco Immediato POII

Simile agli algoritmi di primo livello si prevedono due contributi ma si modifica la maniera in cui essi vengono stimati, tenendo conto di variabili aggiuntive come la pressione e la fase della sostanza al momento del rilascio.

Contributo per l'innesco statico: A differenza del primo livello in cui si definiva un valore puntuale, nel secondo livello si determina una relazione matematica per il suo calcolo: l'equazione 6.9. Si considera allora la sostanza rilasciata a partire dal MIE ed in aggiunta la pressione relativa di processo in psig, la cui però non deve superare i 5,000 psig.

$$POII_{statico} = 0.003 \cdot P^{1/3} \cdot MIE^{-0.6} \quad (6.9)$$

Nel caso in cui la sostanza rilasciata sia in fase liquida, bisogna fare una piccola modifica. A partire di un passaggio matematico si introduce un'espressione di MIE modificata tenendo conto del valore per il liquido e una correzione della temperatura del processo.

Prima di tutto si fa una relazione tra il MIE e la pressione come si specifica nell'equazione 6.10.

$$MIE_v = MIE_{riportato} \cdot \left(\frac{10,000}{P_{liquido}} \right)^{0.25} \quad (6.10)$$

Dopodiché, questo valore di MIE calcolato si corregge con la temperatura, ottenendosi un MIE aggiustato che sarà quello ad utilizzare nell'equazione 6.11 di POII statico.

$$MIE_{adj} = MIE_v \cdot \exp [0.044 \cdot (60 - T)] \quad (6.11)$$

Si ottiene allora una seconda relazione per il POII statico, con l'equazione 6.12.

$$POII_{statico} = 0.003 \cdot P^{1/3} \cdot MIE_{adj}^{-0.6} \quad (6.12)$$

Il $POII_{statico}$ deve avere un valore massimo di 0.9 per garantire che l'innesco ritardato sia preso in considerazione.

Contributo dell'autoignizione: Nella valutazione di secondo livello di questo contributo si esegue la stessa procedura proposta per il livello 1.

Algoritmo finale per il POII: Dai due contributi si ottiene la probabilità di innesco immediato per il livello due come:

$$POII_{Livello 2} = P_{ai} + (1 - P_{ai}) \cdot POII_{statico} \quad (6.13)$$

Come si ha già spiegato si stabilisce un limite massimo di POII di 0.99.

1.1.1.5. Probabilità di Innesco Ritardato PODI

Nel livello due si considerano molte più variabili e quindi si definiscono dei fattori che vanno a modificare il PODI proposto inizialmente, il cui è dipendenti dalla fonte di innesco e la durata di esposizione a detta fonte.

Contributo della forza e durata dell'esposizione alla fonte di innesco: Si definisce la probabilità di innesco ritardato come funzione del tempo di esposizione alla fonte di innesco (t) in minuti, e del fattore S ovvero la forza di essa, i quali si trovano nella tabella 6.2. L'espressione per questo contributo la si vede nell'equazione 6.14.

$$PODI_{S/D} = 1 - [(1 - S^2) \cdot e^{-St}] \quad (6.14)$$

Tabella 6.2: Forza della fonte di innesco, S

Tipo di fonte di innesco	Fonte di innesco	Forza S
Fonti puntuali	Stufa (fired heater)	0.9
	Caldaia (al di fuori)	0.45
	Caldaia (all'interno)	0.23
	Torcia (flare)	1.0
	Motore autoveicolo	0.3
	Nave	0.4
	Treno a diesel	0.4
	Treno elettrico	0.8
	Superfici calde	
Fonti di linea	Linea elettrica ad alta potenza	0.001xLunghezza della linea ricoperta per la nuvola (ft)
	Strada (se l'area della nuvola si conosce)	1-0.7 ^v (v= media di autoveicoli ricoperti per la nuvola)
Fonti di area	Unità di processo (se l'area della nuvola si conosce)	0.9xfrazione dell'unità ricoperta per la nuvola infiammabile
	Popolazione residenziale (se l'area della nuvola si conosce)	0.99 ^N (N= numero di persone ricoperte per la nuvola)
	Area di processo di alta densità	0.25
	Area di processo di media densità	0.15

	Area di processo di bassa densità	0.1
	Spazio confinato senza apparecchiature	0.02
	Area di processo stoccaggio esterno	0.1
	Are di stoccaggio esterno remota	0.025
	Spazio ufficio	0.05

Magnitudine del rilascio: Per il calcolo di questo modificatore si assumono dei valori medi per fare il rapporto tra quello ed il valore misurato. In questo caso si propongono delle relazioni a seconda dei dati disponibili, cioè della quantità di materiale emesso oppure del diametro del foro, ma anche della fase in cui avviene il rilascio. I valori di quantità vengono introdotti in libra massa mentre nel caso dei diametri dovrebbe essere in pollici.

Si deve scegliere tra le equazioni 6.15 e 6.18 quello più adatto ai dati che si abbiano.

$$M_{MAG_{Quantità (liq)}} = \left(\frac{Quantità\ rilasciata}{5,000} \right)^{0.3} \quad (6.15)$$

$$M_{MAG_{Quantità (vap)}} = \left(\frac{Quantità\ rilasciata}{1,000} \right)^{0.5} \quad (6.16)$$

$$M_{MAG_{Diametro (liq)}} = (Diametro\ del\ foro)^{0.6} \quad (6.17)$$

$$M_{MAG_{Diametro (vap)}} = (Diametro\ del\ foro) \quad (6.18)$$

Il $M_{MAG_{Quantità}}$ si ha un valore massimo di 2, mentre per il $M_{MAG_{Diametro}}$ il valore può essere compreso tra 0.3 e 3.

Materiale rilasciato: Come al solito, per tenere conto del materiale si ha una relazione matematica che dipende dal MIE della sostanza. Per ottenere la relazione si ha fatto una piccola modifica nell'equazione 6.5 (del livello 1), al dividere il MIE iniziale tra un fattore e quindi si ha infine l'equazione 6.18. Questo valore deriva dal fatto che il MIE tipicamente varia tra 0.2 e 2 mJ per gli idrocarburi più comuni e quindi si propone 0.5.

$$M_{MAT} = 0.15 - 0.25 \cdot \log\left(\frac{MIE}{0.5}\right) \quad (6.19)$$

Quindi facendo dei passaggi matematici si arriva all'espressione per il modificatore dovuto al materiale, la cui è la 6.20:

$$M_{MAT} = 0.5 - 1.7 \log(MIE) \quad (6.20)$$

Per questo si fissano i limiti tra 0.1 e 3,

Temperature di processo, punto di infiammabilità e punto di ebollizione: Questo si applica in caso di rilascio di sostanze liquidi e può esprimersi in termini del NBP (Normal Boiling Point) oppure dal FP (Flash Point) come si vede nelle relazioni 6.21 e 6.22.

$$M_T = 1 - \frac{(NBP-T)}{230} \quad (6.21)$$

$$M_T = 0.4 - \frac{(T-1.3 \cdot FP)}{230} \quad (6.22)$$

Come al solito si fissano dei valori limiti che può prendere il M_T e sono 0.001 e 1.

Luogo di rilascio: Come detto per il livello 1, il luogo in cui avviene il rilascio influenza la probabilità di innesco, essendo più alta all'interno di uno spazio con rispetto all'aperto dove si può disperdere più facilmente.

$$M_{IN/OUT} = 1.5 \text{ Rilascio all'interno} \quad (6.23)$$

$$M_{IN/OUT} = 1 \text{ Rilascio all'esterno} \quad (6.24)$$

Algoritmo finale per PODI: allora l'algoritmo in complessivo, tenendo conto tutti i fattori sarebbe la 6.25:

$$PODI_{Livello 2} = PODI_{S/D} \cdot M_{MAG} \cdot M_{MAT} \cdot M_T \cdot M_{IN/OUT} \quad (6.25)$$

L'algoritmo può avere un valore massimo di 1 ma si limita questo risultato a 0.9 tenendo conto che normalmente c'è la possibilità che neanche l'innesco ritardato avvenga e quindi il rilascio resti soltanto lì. Questo però non resta importanza all'incidente poiché in alcune situazioni le sostanze sono tossiche o pericolose per l'ambiente e quindi ha un impatto comunque negativo.

1.1.1.6. Probabilità di Esplosione dato un innesco ritardato

Nel caso delle esplosioni ci sono dei fattori importanti che però vanno oltre agli scopi del lavoro pubblicato dalla CCPS. Nonostante ciò, si dà una prima approssimazione considerando altri aspetti che comunque sono pertinenti. In questo livello allora si ha la quantificazione tramite la sostanza rilasciata, la sua magnitudine ed il posto in cui avviene l'incidente.

Modifica per la sostanza chimica: Per tenere conto della sostanza qui si propone un modificatore M_{CHEM} a seconda della FBV o velocità di combustione fondamentale che dipende dalla reattività come si esprime nelle relazioni 6.26, 6.27 e 6.28.

$$M_{CHEM} = 0.5 \text{ se } FBV < 45 \text{ cm/s (Reattività bassa)} \quad (6.26)$$

$$M_{CHEM} = 1.0 \text{ se } 15 < FBV < 75 \text{ cm/s (Reattività media)} \quad (6.27)$$

$$M_{CHEM} = 2.0 \text{ se } FBV > 75 \text{ cm/s (Reattività alta)} \quad (6.28)$$

Modifica per la magnitudine: È correlato al modificatore impiegato per il PODI ma con una influenza un po' inferiore, quindi sarà:

$$POEGDI M_{MAGE} = (PODI M_{MAG})^{0.5} \quad (6.29)$$

Modifica per il luogo: Si prevede che ci sia più probabilità di avere un'esplosione nel caso in cui l'incidente avvenga in un ambiente chiuso, per cui questo modificatore sarà il maggiore. Poi si fa una distinzione per gli incidenti che avvengono in spazi aperti ed è la lontananza o vicinanza delle aree di processo.

$$M_{IN/OUT} = 1.5 \text{ Rilascio all'interno} \quad (6.30)$$

$$M_{IN/OUT} = 1 \text{ Rilascio all'esterno dell'area di processo} \quad (6.31)$$

$$M_{IN/OUT} = 0.5 \text{ Rilascio all'esterno e lontano dall'area di processo} \quad (6.32)$$

Algoritmo finale per POEGDI: Raggruppando tutti i fattori che modificano il valore del primo livello si ha l'espressione 6.33:

$$POEGDI_{Livello 2} = 0.3 \cdot M_{CHEM} \cdot M_{MAGE} \cdot M_{IN/OUT} \quad (6.33)$$

Come al solito, l'equazione può avere un valore massimo di 1.

6.1.3 Algoritmi di Livello 3

Andando ancora avanti, si propone un altro livello di accuratezza per il calcolo delle probabilità per i diversi tipi di inneschi, tenendosi conto altre piccole modifiche nei modelli precedenti oppure aggiungendo nuovi fattori come ad esempio l'incorporazione di qualche sistema protettivo e la sua affidabilità.

1.1.1.7. Probabilità di Innesco Immediato POII

Per quanto riguarda all'innesco immediato, i modelli proposti in questo livello avanzato sono gli stessi a quelli dell'intermedio, con un'unica variazione che si avvicina di più a quello che succederebbe in alcuni casi. Questo è l'utilizzo, non più della temperatura di processo ma invece, una temperatura di rilascio, la cui potrebbe cambiare significativamente o no a seconda della situazione stessa.

Per trovare allora la temperatura di rilascio bisogna fare un ulteriore passaggio che coinvolge la conoscenza dell'entalpia nel punto di rilascio.

Come al solito per il POII si fissa un valore massimo di 0.99

1.1.1.8. Probabilità di Innesco Ritardato PODI

Simile all'innesco immediato, per il caso di innesco ritardato ci sono alcune equazioni che rimangono invariabili ed altre che hanno delle piccole modifiche. Ulteriormente ci sono delle considerazioni in più che riguardano ai sistemi preventivi o protettivi presenti nel luogo dell'incidente.

Contributo della forza e durata dell'esposizione alla fonte di innesco: La procedura iniziale che si fa in questo caso è la stessa a quella del livello due ma adesso c'è uno step aggiuntivo ed è moltiplicare per un fattore correttivo che tiene conto del controllo delle fonti di innesco. Questo moltiplicatore però si applica alla forza, S che sarebbe quella direttamente influenzata nel caso in cui ci sia la presenza di qualche sistema di controllo delle fonti di innesco propriamente.

Detto questo, il fattore prende diversi valori specifici a seconda del grado di controllo, i quali sono 0.7, 1.0 e 1.5 nei casi di "ottimo", "tipico" e "minimo" controllo rispettivamente.

C'è da dire che si deve fare attenzione all'applicarlo visto che il valore finale per la forza, S non può oltrepassare un valore massimo di 1.

Magnitudine del rilascio: Il contributo relativo alla quantità di sostanza rilasciata resta invariabili rispetto a quello proposto al livello intermedio.

Materiale rilasciato: Anche in questo contributo il modello resta uguale a quello del trattamento secondario ma si differenzia per il fatto che, nel caso di MIE per liquidi non si fa quel passaggio di aggiustamento con il MIE_{adj} che si fa dal calcolo del POII nel secondo livello, questo perché si assume che un innesco ritardato succeda strettamente in fase vapore piuttosto che in spray.

Luogo di rilascio: A differenza della maggioranza dei contributi che rimangono quasi invariabili, nel terzo livello si ha più accuratezza in quanto riguarda al luogo dove accade l'incidente. Allora si propongono dei miglioramenti al tenere conto due elementi, cioè la

presenza di sistemi di rilevamento di gas e di ventilazione per disperdere e rimuovere la nuvola di sostanza e come seconda misura, la quantificazione dell'influenza umana rispetto alle altre fonti di innesco presenti.

Influenza umana: In realtà per quanto riguarda questo modificatore, non si tiene conto direttamente la presenza umana come fonte di innesco ma la umidità relativa dell'area di processo come si può apprezzare dall'equazione 6.34. Specificamente si applica soltanto nei casi di rilasci in spazi chiusi e quando negli incidenti in cui si presume suscitato per la presenza umana.

$$M_{RH} = \frac{(100 - 1.5 \cdot \text{umidità relativa})}{25} \quad (6.34)$$

M_{RH} ha un valore limite di 0; nei casi in cui l'innesco non sia stato provocato dalla presenza umana non si tiene conto del moltiplicatore e quindi si usano quelli solitamente descritti nel livello 2

Rilevamento e ventilazione: Uno degli strumenti più diffusi nelle strutture, specialmente degli impianti industriale, sono i rilevatori di sostanze infiammabili o di vapori in generale ed i sistemi di ventilazione. È da aspettarsi che la loro presenza riduca la probabilità di innesco poiché si disperde la sostanza.

Dunque, tenere conto di queste misure porta ad avere un modello più completo e reale, e la maniera come si tengono in conto è tramite il seguente moltiplicatore M_v .

$$M_v = 1.5 \cdot B_{es} \cdot B_{vr} \cdot B_{vdd} \quad (6.35)$$

I termini che compaiono nell'espressione 6.35 sono:

1.5 è il moltiplicatore generale per i rilasci dentro di aree chiuse che viene proposto dal livello due.

B_{es} è un fattore di volume di spazio chiuso (enclosed space) e di conseguenza dipendente dal volume della camera, in ft^3 , ed è calcolato dall'equazione 6.36:

$$B_{es} = \left(\frac{V}{150,000} \right)^{-\frac{1}{3}} \quad (6.36)$$

Ci sono dei valori limiti tra 0.5 e 3 per questo fattore.

B_{vr} invece o fattore di tasso di ventilazione (ventilation rate) dipende dal tasso effettivo di ventilazione o EVR, parametro espresso in quanti cambiamenti di aria si fanno in un'ora. Vedere l'equazione 6.37.

$$B_{vr} = \left(\frac{EVR}{2} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (6.37)$$

Per il calcolo dell'EVR si fa uso della tabella 6.3:

Tabella 6.3: Stima dell'EVR

		Distanza media orizzontale tra rilevatori adiacenti		
		0 – 25 ft	25 – 75 ft	>75 ft o <2 rilevatori in camera
Attivare una maggiore	1 % LFL	5xIVR	3xIVR	IVR
	10 % LFL	3xIVR	IVR	(IVR+NVR)/2

ventilazione al rilevamento di:	25 % LFL	IVR	$(IVR+NVR)/2$	$(IVR \times NVR)^{1/2}$
	100 % LFL	$(IVR+NVR)/2$	$(IVR \times NVR)^{1/2}$	NVR

IVR = Increased Ventilation Rate
NVR = Normal Ventilation Rate
LFL = Lower Flammability Limit

NOTA: Per i materiali infiammabili con un peso molecolare di 20 o superiore, in questo calcolo includere solo i rivelatori situati nella parte inferiore ai 15 piedi dalla camera/edificio. Se il peso molecolare è inferiore a 20, includere tutti i rivelatori nell'edificio. Se non sono presenti rivelatori superiori a 15 piedi di altezza per un materiale a basso peso molecolare, prendere il risultato effettivo della ventilazione dalla tabella e dividerlo per due

Limiti tra 0.3 e 3.

B_{vdd} ovvero fattore di direzione di progetto e prende diversi valori a seconda appunto, della direzione in cui viaggerebbero i vapori grazie ai sistemi. Cioè prende 0.5 se i gas scappano dalle fonti di ignizione, 1 se non c'è una direzione specifica nella progettazione ovvero 2 se i gas infiammabili si avvicinano a probabili fonti di innesco.

Il prodotto di $= 1.5 \cdot B_{es} \cdot B_{vr}$ ha un valore limite di 1.

Esistono dei casi particolari che però sono piuttosto frequenti negli impianti ed è il fatto di tenere delle costruzioni che non sono completamente chiuse e si ha confusione nel momento di classificarle come chiuse o aperte. Si propone allora avere più flessibilità in quanto riguarda al moltiplicatore generale $M_{IN/OUT}$, dandogli non più un valore unico per i rilasci in spazi chiusi, ma una serie di valori spiegati nelle relazioni dalla 6.38 fino la 6.41:

$$M_{IN/OUT} = 1.1 \text{ Strutture con tetto e senza pareti} \quad (6.38)$$

$$M_{IN/OUT} = 1.2 \text{ Strutture con tetto ed una parete} \quad (6.39)$$

$$M_{IN/OUT} = 1.3 \text{ Strutture con tetto e due pareti} \quad (6.40)$$

$$M_{IN/OUT} = 1.4 \text{ Strutture con tetto e tre pareti} \quad (6.41)$$

Misure di mitigazione: Come già detto, in questo livello di raffinatezza è possibile tenere conto dei sistemi di protezione come ad esempio la presenza di sostanze inerti che siano applicate una volta che si rilevi una sostanza infiammabile. Per tenerli conto si utilizza la probabilità di fallimento (FIP) la quale però deve essere calcolata separatamente con delle metodologie fatti apposta per la sua individuazione. Inoltre, bisogna fare attenzione che non si faccia una doppia considerazione del medesimo sistema, incorporandolo dentro dei controlli delle fonti di innesco (ottimo, tipico e minimo) e anche come misura di mitigazione.

Algoritmo finale per PODI: Il nuovo algoritmo tenendo conto tutti i fattori sarebbe:

$$PODI_{Livello 3} = PODI_{S/D} \cdot M_{MAG} \cdot M_{MAT} \cdot M_T \cdot M_{IN/OUT} \cdot FIP \quad (6.42)$$

L'algoritmo può avere un valore tra 0 e 1.

1.1.1.9. Probabilità di Esplosione dato un innesco ritardato

Come si ha spiegato in precedenza, una delle differenze del terzo livello di accuratezza è l'inclusione dei sistemi di protezione. Allora l'unica modifica che si ha in questo caso è propriamente la probabilità di fallimento di questi, per cui l'equazione 6.43 rimane quasi invariabili.

$$POEGDI_{Livello\ 3} = 0.3 \cdot M_{CHEM} \cdot M_{MAGE} \cdot M_{IN/OUT} \cdot FIP \quad (6.43)$$

6.1.4 Multiple fonti di innesco

Nella valutazione del rischio di ignizione è possibile trovare la presenza di una fonte di innesco ma anche di multiple di queste. Tipicamente la presenza di più di una fonte si prende in considerazione negli algoritmi di secondo e terzo livello, quando si prende la forza delle fonti e si sceglie un fattore definito dentro di quelli di “area”, il quale si aspetta raggruppi la forza delle diverse fonti in una sola e quindi si faccia soltanto un calcolo di probabilità.

Nonostante questo, ci sono delle situazioni in cui l’approccio fatto così non è sufficiente sia perché l’area descritta non rappresenta bene la realtà oppure ci sono delle particolarità per cui sarebbe meglio andare a valutare ogni fonte separatamente.

Se si presentano questi casi, la miglior scelta è fare i calcoli di probabilità di innesco ritardato per le singole fonti e finalmente combinarli a seconda della seguente equazione:

$$PODI = 1 - \Pi(1 - PODI_i) \quad (6.44)$$

6.2 Netherlands Organization for Applied Scientific Research TNO

La TNO o Netherlands Organization for Applied Scientific Research, ha sviluppato una procedura per la determinazione delle probabilità di innesco, le cui sono state pubblicate nel suo libro “Purple book: Guidelines for quantitative risk assesment” (Netherlands Organisation for applied scientific research TNO, 2005).

6.2.1 Innesco immediato

Per quanto riguarda all’innesco immediato, chiamato innesco diretto dalla TNO, si propongono dei valori di probabilità di due tipi diversi: il primo per applicare nelle installazioni fisse e facendo una suddivisione per il tipo di sostanza tra K1-liquido, gas di reattività bassa e gas di reattività media o alta, Tabella 6.4; il secondo tipo si applica alle unità di trasporto che sono presenti negli stabilimenti, Tabella 6.5.

Tabella 6.4: Probabilità di innesco diretto per installazioni stazionarie

Fonte		Sostanza		
Continua/(Kg/s)	Istantanea/Kg	K1-Liquido	Gas, Bassa reattività	Gas, Media/Alta reattività
<10	<1,000	0.065	0.02	0.2
10 – 100	1,000 – 10,000	0.065	0.04	0.5
>100	>10,000	0.065	0.09	0.7

Tabella 6.5: Probabilità di innesco diretto nelle unità di trasporto

Fonte	Probabilità di innesco diretto
Autocisterna continuo	0.1
Autocisterna istantaneo	0.4

Vagone cisterna continuo	0.1
Vagone cisterna istantaneo	0.8

6.2.2 Innesco ritardato

La probabilità per l'innescò ritardato può essere calcolata tenendo conoscenza della locazione specifica delle diverse fonti di innesco, a seconda dell'espressione:

$$P(t) = P_{present}(1 - e^{-\omega t}) \quad (6.45)$$

Con questo modello si ottiene una probabilità in un intervallo specifico di tempo e dipende dalla probabilità che ci sia una fonte presente nel momento in cui la sostanza sia dispersa nell'ambiente, $P_{present}$, l'effettività della fonte, ω , che ha dimensioni di s^{-1} e può calcolarsi con la probabilità di innesco in certo intervallo; ed il tempo, t , in s, Tabella 6.6.

Tabella 6.6: Probabilità di innesco per un intervallo di un minuto per un numero di sorgenti

Tipo di fonte di innesco	Fonte di innesco	Forza S
Fonti puntuali	Motore autoveicolo	0.4
	Torcia (flare)	1.0
	Forno esterno	0.9
	Forno interno	0.45
	Caldaia esterna	0.45
	Caldaia interna	0.23
	Nave	0.5
	Nave trasportando materiale infiammabile	0.3
	Nave da pesca	0.2
	Imbarcazione da diporto	0.1
	Treno a diesel	0.4
	Treno elettrico	0.8
Fonti di linea	Linea di trasmissione	0.2 per 100m
	Strada	Nota
	Ferrovia	Nota
Fonti di area	Impianto chimico	0.9 per terreno
	Raffineria	0.9 per terreno
	Industria pesante	0.7 per terreno
	Stoccaggio industriale leggero	0.01 per persona
Popolazione	Residenziale	0.01 per persona

	Forza di lavoro	0.01 per persona
--	-----------------	------------------

Nota: È determinato dalla densità di traffico

6.3 BEVI Manual

Per cominciare, il manuale presenta l'albero degli eventi per diverse situazioni, considerando però che sia diverso a seconda della sostanza coinvolta.

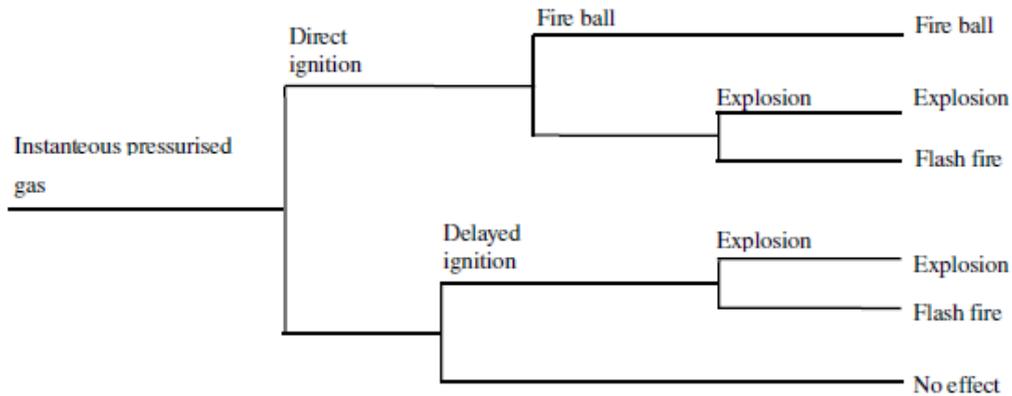


Figura 6.2: Albero degli eventi per un rilascio istantaneo di gas infiammabile. Preso da (National Institute of Public Health and the Environment (RIVM), 2009)

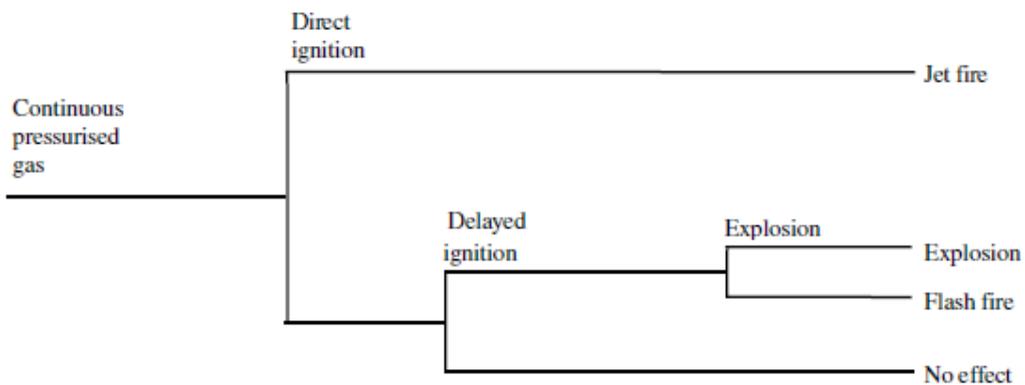


Figura 6.3: Albero degli eventi per un rilascio continuo di gas infiammabile. Preso da (National Institute of Public Health and the Environment (RIVM), 2009)

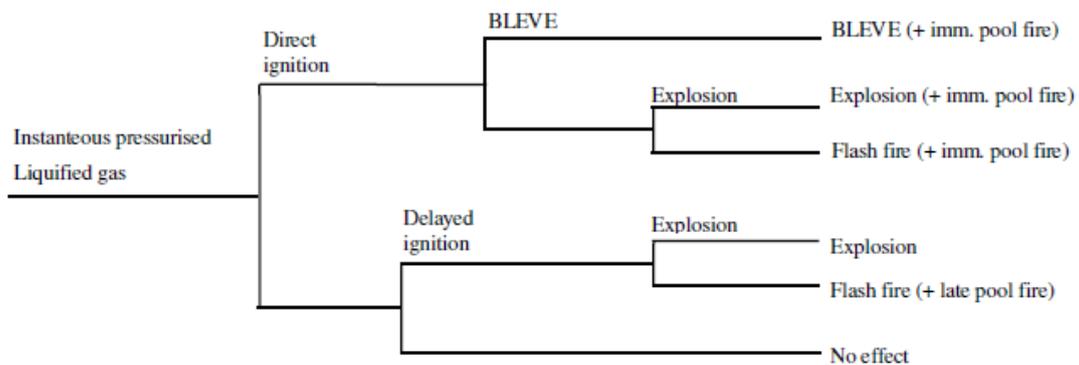


Figura 6.4: Albero degli eventi per un rilascio istantaneo di gas liquefatto pressurizzato infiammabile. Preso da (National Institute of Public Health and the Environment (RIVM), 2009)

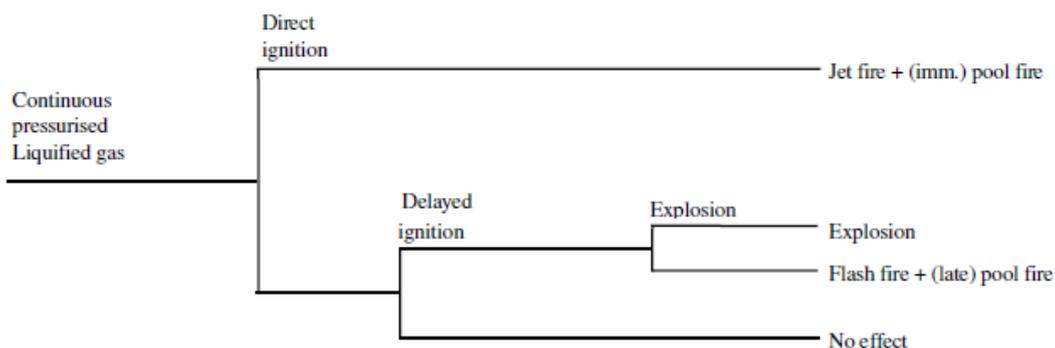


Figura 6.5: Albero degli eventi per un rilascio continuo di gas liquefatto pressurizzato infiammabile. Preso da (National Institute of Public Health and the Environment (RIVM), 2009)

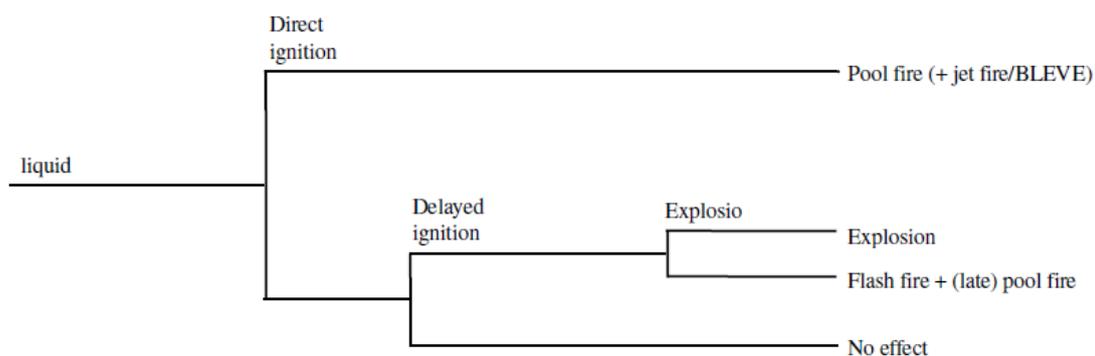


Figura 6.6: Albero degli eventi per un rilascio di liquido infiammabile. Preso da (National Institute of Public Health and the Environment (RIVM), 2009)

Simili alle metodologie applicate nel libro Viola, in questo manuale si propongono dei valori con qualche piccola modifica (National Institute of Public Health and the Environment (RIVM), 2009). Prima di tutto si aggiungono delle categorie nella classifica delle sostanze infiammabili, come si vede nella Tabella 6.7.

Tabella 6.7: Classifica delle sostanze infiammabili

Categoria della sostanza	Categoria WMS	Limiti
Categoria 0	Estremamente infiammabile	Sostanze liquide e preparazioni con un punto di infiammabilità (Flash point) o l'inizio del punto di ebollizione, $\leq 35^{\circ}\text{C}$; Sostanze gassose e preparazioni che possono innescarsi a temperatura e pressione normale dopo l'esposizione all'aria
Categoria 1	Altamente infiammabile	Sostanze liquide e preparazioni con un punto di infiammabilità (Flash point) $< 21^{\circ}\text{C}$, e che non siano estremamente infiammabili
Categoria 2	Infiammabile	Sostanze liquide e preparazioni con un punto di infiammabilità (Flash point) $\geq 21^{\circ}\text{C}$ e $\leq 55^{\circ}\text{C}$

Categoria 3		Sostanze liquide e preparazioni con un punto di infiammabilità (Flash point) $\geq 55^{\circ}\text{C}$ e $\leq 100^{\circ}\text{C}$
Categoria 4		Sostanze liquide e preparazioni con un punto di infiammabilità (Flash point) $\geq 100^{\circ}\text{C}$

WMS: Wet milieugevaarlijke stoffen (Environmentally Hazardous Substances Act)

6.3.1 Innesco immediato

A seconda della categoria della sostanza e delle sorgenti si hanno per gli inneschi immediati i seguenti valori, presenti nelle Tabelle 6.8 e 6.9:

Tabella 6.8: Probabilità di innesco diretto per installazioni stazionarie

Categoria	Sorgente continua (Kg/s)	Sorgente istantanea (Kg/s)	Probabilità di innesco diretto
Categoria 0 Reattività media/alta	<10	<1,000	0.2
	10 – 100	1,000 – 10,000	0.5
	>100	>10,000	0.7
Categoria 0 Reattività bassa	<10	<1,000	0.02
	10 – 100	1,000 – 10,000	0.04
	>100	>10,000	0.09
Categoria 1	Qualsiasi portata	Qualsiasi quantità	0.065
Categoria 2	Qualsiasi portata	Qualsiasi quantità	0.01
Categoria 3, 4	Qualsiasi portata	Qualsiasi quantità	0

Tabella 6.9: Probabilità di innesco diretto nelle unità di trasporto

Categoria	Unità di trasporto	Scenario	Probabilità di innesco diretto
Categoria 0	Autocisterna	Continuo	0.1
		Istantaneo	0.4
	Vagone cisterna	Continuo	0.1
		Istantaneo	0.8
	Nave- cisterna di gas	Continuo, 180 m ³	0.7
		Continuo, 90 m ³	0.5
Nave- semi cisterna di gas	Continuo	0.7	
Categoria 1	Autocisterna - vagone cisterna - nave	Continuo	0.065
		Istantaneo	
Categoria 2	Autocisterna - vagone cisterna - nave	Continuo	0.01
		Istantaneo	

Categoria 3, 4	Autocisterna - vagone cisterna - nave	Continuo	0
		Istantaneo	

6.3.2 Innesco Ritardato

Si danno delle relazioni e valori a seconda della categoria, tenendo conto che all'essere innesco ritardato, le sostanze appartenenti alle categorie 2, 3 e 4, le cui sono di per sé poco infiammabili, difficilmente si innescherebbero grazie alla loro dispersione. Tabella 6.10.

Tabella 6.10: Probabilità di innesco ritardato

Categoria	Probabilità di innesco ritardato per le nuvole di grande misura, PR ^m	Probabilità di innesco ritardato, GR
Categoria 0	1 – P _{innesco diretto}	Fonti di innesco
Categoria 1	1 – P _{innesco diretto}	Fonti di innesco
Categoria 2	0	0
Categoria 3	0	0
Categoria 4	0	0

PR: Location specific risk

6.4 Changlong et al

(Changlong, et al., 2012) hanno trovato il seguente modello empirico delle equazioni 6.46 e 6.47 per individuare la probabilità di innesco ritardato, il cui dipende della fase della sostanza e la sua portata massica, in Kg/s.

$$P_{inn.ritardato,gas} = (e^{-4.16} \cdot m^{0.642}) \cdot (e^{-2.995} \cdot m^{0.38}) \quad (6.46)$$

$$P_{inn.ritardato,liq} = (e^{-4.333} \cdot m^{0.392}) \cdot (e^{-2.995} \cdot m^{0.38}) \quad (6.47)$$

6.5 International Association of Oil and Gas Producers

Un altro modello da considerare e segnalato nel lavoro di (Changlong, et al., 2012) è questo in cui, a seconda dei dati per il tipo di scenario e la portata rilasciata RR dalla Tabella 6.11, si propone una relazione di tipo logaritmico, 6.48.

Tabella 6.11: Dati per le correlazioni

Tipo di scenario	Punto 1		Punto 2		Punto 3		Punto 4	
	RR (Kg/s)	P	RR (Kg/s)	P	RR (Kg/s)	P	RR (Kg/s)	P
Piccoli impianti di gas GPL	0.1	0.001	1.00	0.002 5	3.00	0.01	498.99	0.60

Piccoli impianti di liquidi	0.1	0.001	1.00	0.002 4	100.0	0.10		
Grandi impianti di gas GPL	0.1	0.001	1.00	0.002 5	260.0	0.65		
Grandi impianti di liquidi	0.1	0.001	1.00	0.002 5	109.99	0.13		
Grandi impianti di gas saturato GPL	0.1	0.001	1.00	0.002 5	70.00	0.43	325.03	0.07
Serbatoio di impianto di gas GPL	0.1	0.001	1.00	0.002 2	102.84	1.00		
Serbatoio di stoccaggio di gas GPL industriale	0.1	0.001	1.00	0.002 2	100.00	0.23	988.11	1.00
Serbatoio di stoccaggio di gas GPL rurale	0.1	0.001	1.00	0.002 2	10.00	0.02	52551	0.50
Processi off-shore di liquidi	0.1	0.001	1.00	0.02				
Processi off-shore di gas tipici	0.1	0.001	1.00	0.01	37.01	0.04		
Serbatoio di diesel liquido e fuel oil	0.1	0.001	1.00	0.001	7.00	0.001 4	25.55	0.002 4

$$\log P_{ign} = \log P_{ign,min} + \frac{(\log Q - \log Q_{min}) \cdot (\log P_{ign,magg} - \log P_{ign,min})}{\log Q_{magg} - \log Q_{min}} \quad (6.48)$$

Dove P_{ign} è la probabilità che si vuole determinare e corrispondenti per la portata Q ; $P_{ign,min}$ è la probabilità alla portata Q_{min} (relativa alla sezione, ovvero ai 4 diversi punti) e $P_{ign,magg}$ invece alla portata Q_{magg} (anch'essa relativa ai punti)

6.6 Moosemiller

In questo lavoro sviluppato da (Moosemiller, 2011), si propone l'albero degli eventi mostrato nella figura 6.2 ed a seconda di quello e dal prodotto della combinazione di qualche approssimazione proposta nella letteratura e dall'opinione degli esperti nella tematica si propongono dei modelli.

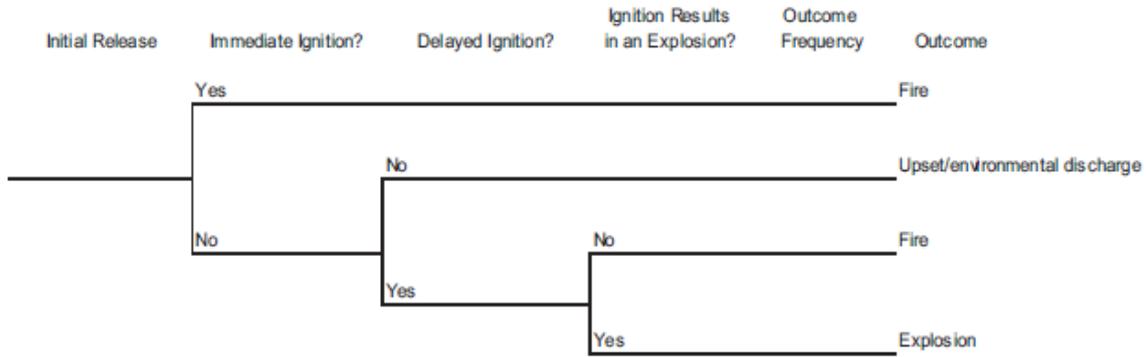


Figura 6.7: Albero degli eventi per calcolare le frequenze. Preso da (Moosemiller, 2011)

I valori che per difetto si riferenziano qui sono:

- Probabilità di innesco immediato: 0.15
- Probabilità di innesco ritardato: 0.30
- Probabilità di esplosione, dato un innesco immediato: 0.20

6.6.1 Innesco immediato

Come risultato della ricerca, si determina che l’innesco immediato dipende da due fattori che sono il potenziale di autoinnesco, P_{ai} ed il potenziale di scarica elettrica P_{sd} . Di questa maniera l’espressione proposta resta ad essere la 6.49 o meglio la 6.50:

$$P_{imm,ign} = P_{ai} + P_{sd} \quad (6.49)$$

Ovvero

$$P_{imm,ign} = 1 - 5.000 \cdot e^{-9.5 \cdot (T/AIT)} + 0.0024 \cdot P^{1/3} \cdot MIE^{2/3} \quad (6.50)$$

Dove la temperatura, T e la temperatura di autoinnesco AIT, sono in °F, la pressione P in psig ed il MIE in mJ.

Ci sono delle limitazioni che sono date nelle equazioni 6.51 e 6.52:

$$T/AIT < 0.9 \quad \therefore P_{ai} = 0 \quad (6.51)$$

$$T/AIT > 1.2 \quad \therefore P_{ai} = 1 \quad (6.52)$$

Allo stesso modo i valori 0 ed 1 sono i valori limiti per cui, la probabilità non può andare al di fuori di questi.

6.6.2 Innesco Ritardato

La probabilità di innesco ritardato viene modificato con i seguenti fattori, equazioni 6.53 alla 5.56:

Fattore per il materiale: con dei limiti tra 0.3 e 3:

$$M_{MAT} = 0.6 - 0.85 \log(MIE) \quad (6.53)$$

Fattore per la magnitudine del rilascio: Il cui valore ha un limite superiore di 2:

$$M_{MAG} = 7 \cdot e^{[0.642 \cdot \ln(FR) - 4.67]} \quad (6.54)$$

FR: portata in lbm/s

Fattore per la durata e densità e forza delle sorgenti di innesco:

$$P_{ign} = 1 - k \cdot e^{-at} \quad (6.55)$$

Con k ed a come costanti della forza ed il tempo, rispettivamente. Il modificatore allora viene ad essere:

$$M_{dur} = \frac{1 - [(1 - S^2) \cdot e^{-(0.015 \cdot S) \cdot t}]}{0.3} \quad (6.56)$$

Il tempo t , come al solito si trova in s . mentre la forza S è stata già spiegata nella metodologia della CCPS [1]

Fattore per il posto di rilascio: Come già spiegato in (CCPS Center for Chemical Process Safety, 2014) si usa un moltiplicatore di 2 per un rilascio che avviene in un luogo chiuso. Analogamente al livello avanzato da questo riferimento è possibile applicare un ulteriore migliora aggiungendo delle espressioni per la ventilazione

Fattore per le fonti elettriche: Questo algoritmo ha una misura in più in quanto si tiene conto della classifica elettrica delle aree. Se appartiene alla Classe 1, Divisione 1 si moltiplica per 0.5: nel caso di Classe 1, Divisione 2 il fattore sarebbe di 1 se questa si trova a più di 100 ft dal punto di rilascio, oppure di 1.5 se più vicino; infine per le aree che non sono dentro della classifica si usa un moltiplicatore di 2.

In riassunto, la probabilità di innesco ritardato si calcola come:

Se il prodotto di ciascun moltiplicatore è maggiore di 1 si fa uso dell'equazione 6.57:

$$P_{ign,rit} = 1 - \frac{0.7}{\prod(M_i)} \quad (6.57)$$

Se invece è minore di 1, l'equazione 6.58:

$$P_{ign,rit} = 1 - \prod(M_i) \quad (6.58)$$

6.6.3 Esplosione

Si propone che la probabilità di esplosione dato un innesco ritardato sia dipendente dalla portata FR, relazione 6.59:

$$P_{esp} = 0.024 \cdot FR^{0.435} \quad (6.59)$$

Si aspetta che le sostanze che hanno una reattività elevata siano più propense a provocare delle esplosioni, per cui al risultato ottenuto in precedenza lo si moltiplica per un fattore di 0.3 nel caso di sostanze poco di bassa reattività e di 3 per quelle di alta reattività, invece resta invariato nel caso di reattività media.

6.7 Rew, Spencer, Daycock

Dall'analisi di metodi esistenti e la raccolta di dati fatta da (Rew, et al., 2000) si propone un approccio ad un modello, il quale si basa su quattro parametri che sono:

- Parametro μ che corrisponde al numero medio di fonti di innesco presenti per unità di area.

- Parametro p è il potenziale di innesco della fonte. La fonte di innesco ha una certa energia disponibile mentre il combustibile ha bisogno di un'altra quantità di energia. Allora la probabilità di innesco dipenderà dal rapporto tra queste due.
- Parametro λ o tasso di attivazione della fonte ovvero la frequenza con cui la fonte diventa attiva.
- Parametro a è la proporzione di tempo che la fonte resta attiva.

In questo caso però, non si calcola la probabilità di innesco ma di non innesco $Q_1(t)$, equazione 6.60, e dipende dal tempo medio che la fonte è attiva, t_a ed il tempo medio tra questi momenti di attività, t_i 6.61 e 6.62

$$Q_1(t) = (1 - ap) \cdot e^{-\lambda pt} \quad (6.60)$$

$$a = \frac{t_a}{t_a + t_i} \quad (6.61)$$

$$\lambda = \frac{1}{t_a + t_i} \quad (6.62)$$

Un'altra maniera di calcolare la probabilità è data nel caso in cui le sorgenti siano distribuite aleatoriamente ed in una media di μ sorgenti per unità di area A , e quindi possono assumere una distribuzione di Poisson con media e varianza di μA , vedere equazioni 6.63, 6.64 e 6.65.

$$S_n = \frac{e^{-\mu A} (\mu A)^n}{n!} \quad (6.63)$$

Allora la probabilità può esprimersi come:

$$Q_A(t) = \sum_{n=0}^{\infty} S_n (1 - ap)^n \cdot e^{-n\lambda pt} \quad (6.64)$$

Ovvero

$$\ln[Q_A(t)] = -\mu A \cdot [1 - (1 - ap) \cdot e^{-\lambda pt}] \quad (6.65)$$

I parametri però sono stati stimati a seconda de statistiche pubblicate e quindi si hanno delle tabelle con detti valori a seconda del tipo di area in cui avviene il rilascio, cioè rurale e urbana-

6.8 Ronza, Vilchez, Casal

In questo studio in particolare, (Ronza, et al., 2007).fanno un'analisi da due banche dati dove si riportando degli incidenti di fuoriuscite, HMIRS (Hazardous Materials Incident Reporting System) e MINMOD (Marine Casualty and Pollution Database) ottenendosi due modelli da applicare in situazioni diverse: la valutazione dei rischi nel trasporto terrestre di sostanze e nel trasporto marittimo.

Innanzitutto, si fa vedere l'albero degli eventi nella Figura 6.3

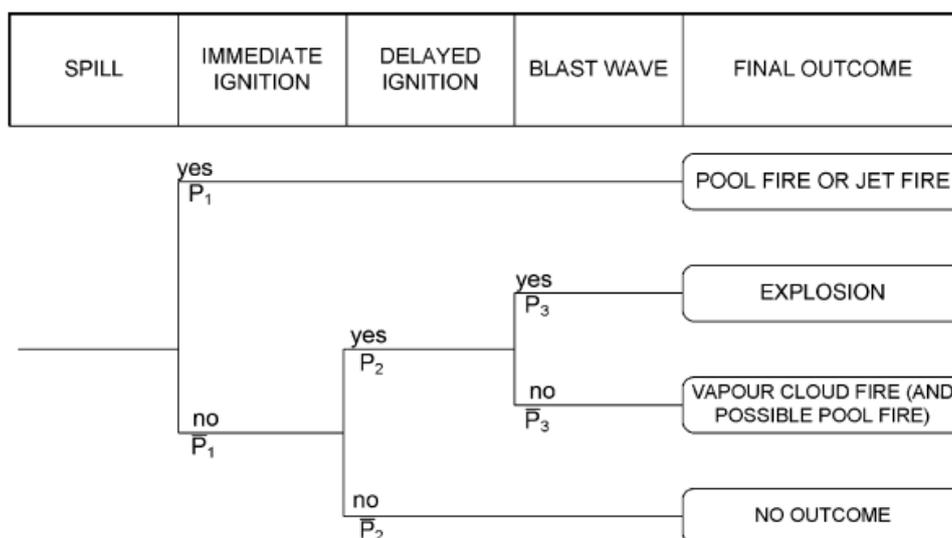


Figura 6.8: Albero degli eventi. Preso da (Ronza, et al., 2007)

Date storiche possono essere utilizzate per standardizzare le probabilità di innesco. Di questa maniera, tramite l'utilizzo dei dati storici e analizzandoli in maniera da definire delle variabili che incidono e, in questo caso facendo dei grafici, si sono ottenuti dei modelli empirici per quantificare la probabilità di innesco ed esplosione.

Nel caso di fuoriuscite nel trasporto terrestre si propone la relazione 6.66:

$$P_1 + \bar{P}_1 \cdot P_2 = a \cdot Q^b \quad (6.66)$$

Per il trasporto marittimo invece, la relazione 6.67:

$$P_1 + \bar{P}_1 \cdot P_2 = \frac{c}{1+a \cdot Q^{-f}} \quad (6.67)$$

Dove a, b, c, d ed f sono dei coefficienti introdotti dal processo di aggiustamento dei dati (fitting) e si trovano nella Tabella 6.12.

Tabella 6.12: Valori per i parametri a e b

Sostanza	Trasporto terrestre		Trasporto marittimo		
	a	b	c	d	f
GPL	0.022	0.32	-		
Frazioni leggere	0.00027	0.72	0.039	6.49	0.76
Olio crudo, kerosene/jet fuel, diesel oil/gas	0.00055	0.53	0.013	40.75	1.00
4-6 fuel oil	0.00	-	0.00	-	-

Anche per le esplosioni si propone una metodologia di calcolo. Seguendo la relazione 6.68:

$$P_3(\text{quantità } i, \text{ sostanza } j) = \text{Prob generale quantità} \cdot \frac{\text{Prob media sostanza } j}{\text{Prob media base dati}} \quad (6.68)$$

Per entrambi i calcoli delle probabilità medie citati nell'equazione precedente, si fa uso dei dati riportati dalla relazione 6.69:

$$P_3' = \frac{n^\circ \text{ esplosioni}}{n^\circ \text{ incendi}} \quad (6.69)$$

Da queste due si ottengono dei valori specifici per i due tipi di trasporti ed a seconda della famiglia di sostanze. I valori sono nella Tabella 6.13.

Tabella 6.13: Probabilità di esplosione come funzione della quantità rilasciata

Modalità di trasporto	Quantità rilasciata (Kg)	Probabilità di esplosione generica	Probabilità di esplosione specifica			
			GPL	Frazioni leggere	Olio crudo, kerosene/jet fuel	Diesel oil/gas
Terrestre	0 – 100	0.06	0.043	0.067	0.088	0.044
	100–10,000	0.30	0.22	0.34	0.44	0.22
	>10,000	0.40	0.29	0.45	0.58	0.29
Marittimo	100–10,000	0.25	-	0.33	0.38	0.18
	>10,000	0.37	-	0.48	0.57	0.27

Infine, in riassunto si ha la Tabella 6.14.

Tabella 6.14: Riassunto delle probabilità

Evento	Dati di probabilità		
	Trasporto terrestre	Trasporto marittimo	Impianti fissi
Probabilità di innesco generalizzata ($P_1 + \bar{P}_1 \times P_2$)	Dall'equazione 6.66 ed i parametri a, b della tabella 6.12	Dall'equazione 6.67 ed i parametri c, d, f della tabella 6.12	Si usano valori medi tra quelli di trasporto marittimo e terrestre
Innesco immediato/ritardato	Relazione tra le probabilità di innesco ritardato ed immediato 1:1 per frazioni leggere (nafta, benzina, ecc) e GPL 1:10 per diesel, kerosene e olio crudo		
Esplosione	Tabella 6.13	Tabella 6.13	Si usa la probabilità per il trasporto terrestre della tabella 6.13

6.9 Changlon et al

Per la definizione di questo nuovo modello, gli autori fanno riferimento ad altri modelli che sono stati già spiegati lungo questa sezione. Loro li classificano a seconda dei fattori in cui sono stati basati come MP per quelli che fanno uso delle proprietà delle sostanze, Q quando si utilizza la portata di sostanza rilasciata ed IS se si tengono in conto le fonti di innesco.

Oltre a questa classifica si propone un fattore K_{IC} che dipende dai controlli che ci siano per le fonti di innesco e si possono visionare nella Tabella 6.15.

Tabella 6.15: Controllo delle fonti di innesco

Tipo	Probabilità di innesco, in presenza di sostanze infiammabili		Controllo
	Quantitativa	Qualitativa	
Ideale	0	Nulla	La progettazione e la manutenzione non garantiscono in nessun momento una fonte di innesco
Eccellente	0.1	Minima	Ben progettato e mantenuto – L’innesco si deriva solo da eventi rari (ad esempio imprevisti guasti di attrezzature)
Tipica (ottimo)	0.25	Limitata	Progettato per soddisfare gli standard e mantenuto regolarmente – l’innesco è eliminato durante il normale funzionamento, ma esiste un potenziale guasto dei sistemi o modifica delle circostanze con conseguente fonte di accensione occasionale
Povera	0.5	Scarsa	Non soddisfa gli standard precisi ed è mal gestito - potenziale che si verifichino fonti di ignizione
Nulla	>0.5	Nulla	Nessuna aderenza agli standard e poca manutenzione - potenziale significativo che si verifichino fonti di ignizione

Dunque, come approccio finale si propone di andare a calcolare le probabilità con un modello presente in ciascuna delle categorie MP, Q ed IS; si consiglia utilizzare il modello del manuale BEVI per quanto riguarda alla categoria MP, quello proposto dalla International Association of Oil and Gas Producers nella categoria Q ed infine l’approccio di (Rew, et al., 2000) come IS. Dopodiché si sceglie quella che generi un valore maggiore e la si moltiplica per il fattore K_{IC} , ottenendo così il valore finale, come si fa vedere nell’espressione 6.70.

$$P_{IP} = \text{Max}(P_{MP}, P_Q, P_{IS}) \cdot K_{IC} \quad (6.70)$$

Si prende il valore massimo invece del minimo con lo scopo di ottenere un risultato più conservativo.

6.10 Strumento di calcolo – Modello CCPS

Come si ha detto fin dall’inizio, uno degli obiettivi di questa ricerca è sviluppare uno strumento di calcolo seguendo i modelli del CCPS. Per fare ciò si utilizza un foglio calcolo e si fanno delle schede utilizzando VBA, Visual Basic for Applications.

Nella Figura 6.9 si ha l’ambiente di inizio che si trova all’ingressare nel programma.

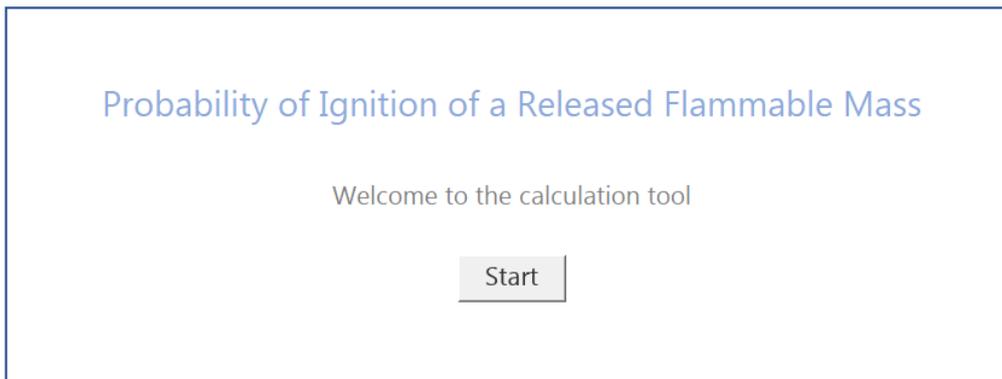


Figura 6.9: Benvenuto al programma

Subito dopo, si apre una finestra, che si mostra nella Figura 6.10, per cominciare ad esplorarlo. In questa finestra si hanno due sezioni, una per scegliere la sostanza chimica coinvolta nel rilascio e la seconda per definire quale sarà il livello del modello ad applicare.

Probability of Ignition

Chemical substance

Chemical released

MIE mJ

AIT °F

FP °F

NBP °F

Reactivity

Analysis level

Level

Figura 6.10: Inizio del programma

Come detto, nella prima sezione si sceglie il materiale, e quindi lì si ha un listbox dove si apre un elenco di sostanze chimiche che si trova salvata in uno dei fogli del file Excel come si mostra nella Figura 9.11. Nel momento in cui si clicca su una di essa si portano i valori delle proprietà nei Textbox disposti a quel scopo, come nella Figura 9.12.

Chemical substance

Chemical released

MIE

AIT

FP

NBP °F

Reactivity

Clear

- Acetaldehyde
- Acetic Acid
- Acetic Anhydride
- Acetone
- Acetone Cyanohydrin
- Acetonitrile
- Acrolein
- Acrylonitrile

Figura 6.11: Lista di sostanze

Chemical substance

Chemical released

MIE mJ

AIT °F

FP °F

NBP °F

Reactivity

Clear

Figura 6.12: Proprietà della sostanza

Nella seconda sezione, si ha il listbox che fa vedere quali sono i livelli degli algoritmi (Figura 6.13) e nel momento in cui si sceglie uno di essi si informa all'utente quali sarebbero i metodi di valutazione dei rischi nei cui è utile impiegare tal livello. Questo si fa vedere nelle Figure 6.14 a 6.16.

Analysis level

Level

- Level 1 - Basic
- Level 2 - Intermediate
- Level 3 - Advance

Select

Exit

Figura 6.13: Elenco dei livelli

Analysis level

Level

Level 1 is a Basic Analysis used to execute PHA risk matrix and in some cases LOPAs and FMECAs application.

Figura 6.14: Descrizione livello 1

Analysis level

Level

Level 2 is an Intermediate Analysis used to execute LOPAs and FMECAs application and the screening-level quantitative risk assessments, QRA.

Figura 6.15: Descrizione livello 2

Analysis level

Level

Level 3 is an Advanced Analysis used to perform quantitative risk assessments, QRAs, related cost-benefit analysis and more detailed consequences studies.

Figura 6.16: Descrizione livello 3

6.10.1 Livello 1

Quando si sceglie il primo livello nella finestra di inizio del programma, compare subito il formulario con i dati necessari per fare un'analisi di questo tipo, oltreché la sezione dei risultati dove si trovano separatamente i valori trovati per la probabilità di innesco immediato, POII, di innesco ritardato, PODI e di esplosione POEGDI. Vedere la Figura 6.17.

Da sottolineare il fatto che nei dati di rilascio si chiede soltanto la temperatura e la locazione dell'incidente, perché in questo livello basico si fa un primo screening della probabilità e non si ha bisogno di tanti dati per i calcoli. Nel caso della temperatura è possibile ingressare il valore sia in gradi Celsius che Fahrenheit, e quindi accanto allo spazio per mettere detto valore si trova il listbox per scegliere queste unità. Questo lo si può vedere nella Figura 6.18

Figura 6.17: Analisi di primo livello

Figura 6.18: Scelta delle unità di misura a) e la locazione b)

6.10.2 Livello 2

Scegliendo ora il secondo livello compare l'ambiente di lavoro per fare un'analisi di questo tipo. Nella Figura 6.19 si vede già come questo differisce dal primo nella quantità di dettagli dell'incidente che si deve conoscere. Qua si chiede non solo la temperatura di rilascio ma anche la pressione e la fase, così come dei dettagli sulla fonte di innesco, la durata dell'emissione e la quantità di materiale scaricato (o la dimensione del diametro se non si ha una portata).

Nella sezione della forza di innesco, Figura 6.20, si ha un elenco delle possibili fonti trovate negli impianti, una volta si sceglie allora si porta il valore della forza nel Textbox dedicato a quel valore. Inoltre, per la durata è possibile inserire il tempo sia in minuti che in secondi.

Allo stesso modo, le Figure 6.21a, 6.21b e 6.21c fanno vedere le opzioni che si offrono per quanto riguarda le misure di quantità di sostanza e dimensione del foro.

Level 2 - Intermediate Analysis

Release Data

Process Temperature

Process Pressure

Phase

Location

Ignition source

Ignition source

Duration

Strength

Magnitude of release

Available data

Amount released

Hole diameter

Immediate Ignition

POII static

Pai Autoignition

POII Level 2

Immediate Ignition

PODI S/D

Mmag

Mmat

Mt

Min/out

PODI Level 2

Explosion

Mchem

Mmage

Min/out

POEGDI Level 2

Figura 6.19: Analisi di secondo livello

Ignition source

Ignition source

Duration

Strength

Magnitude of release

Available data

Amount released

Hole diameter

Ignition source

Ignition source

Duration

Strength

a) b)

Figura 6.20: Scelta della fonte di innesco a) e dell'unità di tempo b)

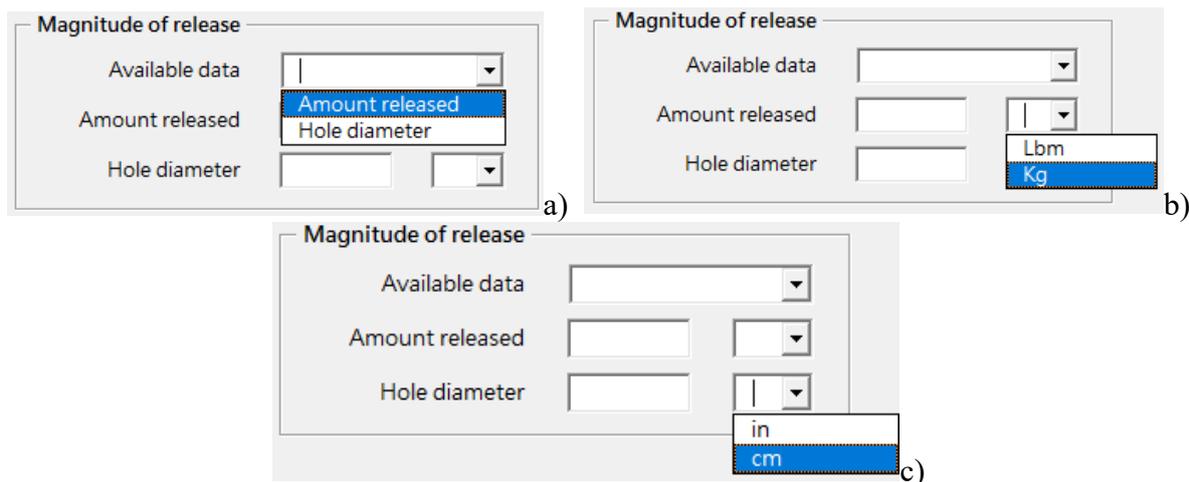


Figura 6.21: Dati di magnitudo di sostanza a) unità di massa b) e unità per il foro c)

6.10.3 Livello 3

Infine, si ha il terzo livello. Questo essendo il più completo di tutti presenta un ambiente di lavoro più complesso in quanto richiede ancora più dettagli sul sistema che si sta valutando. Come prima osservazione bisogna dire che si includono gli stessi fattori del secondo livello come la fonte di innesco, la durata dell'emissione, la quantità di sostanza e certamente le condizioni basiche del rilascio come temperatura e pressione.

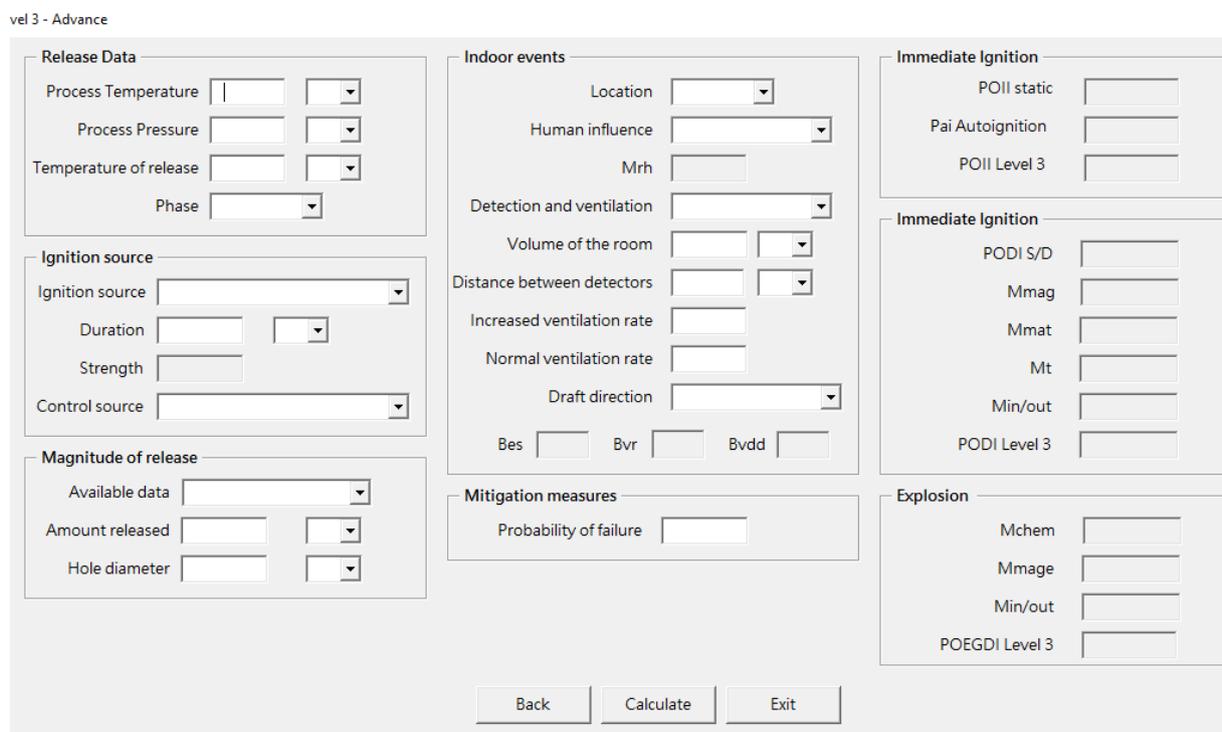


Figura 6.22: Analisi di terzo livello

Tra i dettagli aggiuntivi si trova l'opzione di scegliere se la fonte di innesco presenta qualche controllo poiché questo modifica la forza. Figura 6.23.

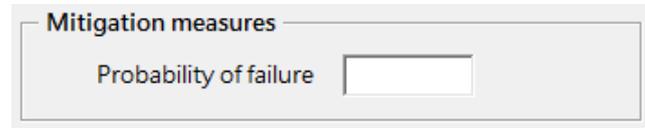
Figura 6.23: Controllo della fonte di innesco

Inoltre, si approfondizza sul posto in cui accade l'incidente, aggiungendo per esempio la possibilità che ci sia influenza delle persone nell'innesco, e considerando i sistemi di ventilazione presenti. Figura 6.24.

Figura 6.24: Miglioramenti del terzo livello

Figura 6.25: Scelta dei fattori per un evento indoor

Per finire, il fattore più importante che ha il terzo livello dei modelli è il tasso di guasto dei sistemi di protezione con cui il sistema conta per mitigare le conseguenze nel momento in cui si arrivi all'incidente. Nel caso in cui ci sia più di una misura di protezione, allora si moltiplicano i corrispondenti FIP o failure rate e si inserisce un solo valore,



The image shows a screenshot of a software interface. At the top, there is a section titled "Mitigation measures" in a light gray box. Below this title, the text "Probability of failure" is displayed next to a small, empty rectangular input field.

Figura 6.26: FIP per il terzo livello

7. Applicazione

Fin dall'inizio della presente tesi si ha specificato che si vuole fare una valutazione dei modelli per la probabilità di innesco delle sostanze infiammabili. In particolare, si applica la metodologia della CCPS (CCPS Center for Chemical Process Safety, 2014) poiché si tratta di quella più completa ed è stata formulata dopo uno studio rigoroso di tutte le altre metodologie, anch'esse riportate nel capitolo 6.

Per tale scopo si hanno due casi studio tenendo conto che uno è una sostanza infiammabile capace di formare una miscela infiammabile con l'aria, mentre il secondo si tratta di una polvere la cui ha il rischio di esplosione.

I. modelli spiegati sono applicabili soltanto a sostanze in stato liquido e vapore, escludendo così le polveri dovuto alla difficoltà che esiste nel trovare delle magnitudini delle proprietà fisicochimiche coinvolte, e anche della frequenza con cui viene disturbato uno strato di polvere in modo che provochi delle situazioni di reale pericolo.

Nonostante questa limitazione, in cui si sa che non è possibile generalizzare, si potrebbero applicare questi algoritmi tenendo conto delle considerazioni logiche e ragionandoci a seconda del risultato ottenuto, almeno per farci una vaga idea e riuscire a dare una quantità alla probabilità anche per le sostanze polverulente.

7.1 Area di scarica e stoccaggio di metanolo da un'autobotte

Per l'applicazione dei modelli trovati in una sostanza liquida/gas si propone un caso studio fornito da ARIA (Analisi dei Rischi Industriali e Ambientali), azienda specializzata nell'analisi dei rischi industriali, l'ambiente, sicurezza e salute dei lavoratori (ARIA s.r.l., s.f.); la cui collabora continuamente con il Politecnico di Torino tramite il centro di studi SAFeR, partecipando in progetti di ricerca e gruppi di lavoro.

7.1.1 Descrizione del sistema:

Per la produzione di alcune colle e resine si fa uso di diverse materie prime tra cui alcune de essi hanno un certo grado di pericolosità. Nell'impianto di studio in particolare si utilizzano sostanze come la formaldeide, la formurea, la soda caustica, il metanolo tra gli altri.

Il sistema che si propone di valutare consiste propriamente nella sezione di scarico e stoccaggio del metanolo, il cui viene trasportato in un'autobotte e scaricato in essa attraverso un braccio di carico connesso dalla parte inferiore del medesimo e pompato verso i serbatoi, i quali si trovano interrati e polmonati con azoto per equilibrare la pressione. La baia di scarico dove si posiziona l'autobotte è dotata di versatori di schiuma ad attivazione manuale come sistema di protezione nel caso in cui si presenti un rilascio incidentale della sostanza. L'autobotte presenta inoltre due monitori a schiuma con il medesimo scopo.

Tenendo conto di quanto detto nel capitolo 3 riguardo alle miscele esplosive, e soprattutto alla normativa ATEX riguardo alla classificazione delle aree di rischio per le sostanze combustibile, si attribuisce al sistema come zona 1: Luogo in cui un'atmosfera esplosiva costituita da una miscela di aria – sostanze infiammabili sotto forma di gas, vapore o nebbia può verificarsi occasionalmente durante il normale funzionamento. Non si vede la necessità di assegnare una zona 0 visto che la presenza di un'atmosfera esplosiva si avrebbe solo nel caso

di avere un rilascio al momento dello scarico, allora non si verifica che questa sia presente continuamente durante il normale funzionamento.

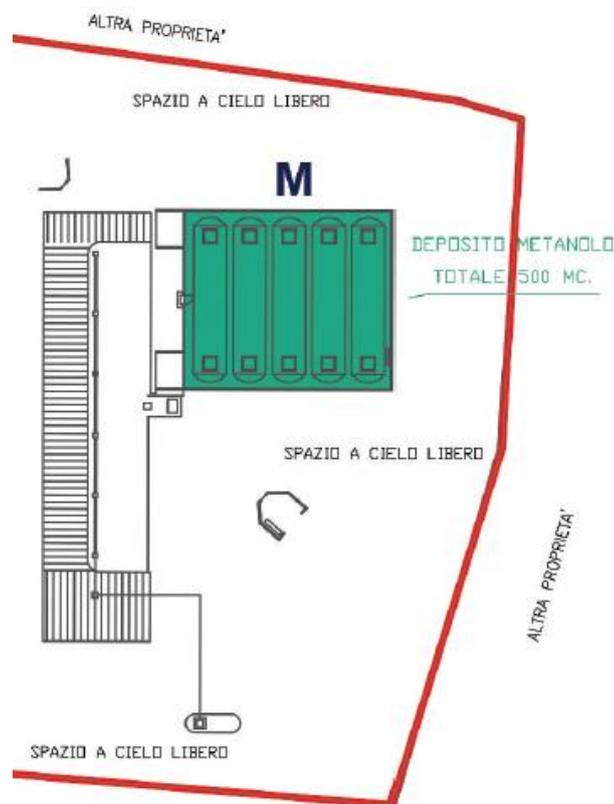


Figura 7.1: Planimetria della baia di scarico e stoccaggio del metanolo. Preso da (ARIA s.r.l., s.f.)

7.1.2 Sostanza di interesse

Una delle prime cose da fare al momento di fare la valutazione di rischio è conoscere la sostanza o le sostanze coinvolte e le sue proprietà per poter capire quali sono i pericoli esistenti e le azioni da prendere in considerazione per la gestione di qualche eventualità. Essendo il metanolo la sostanza manipolata nel sistema, si fa una breve descrizione e si elencano, nella tabella 7.1, alcune delle proprietà di interesse (Speight, 2017).

Dunque, l'Istituto di Metanolo (MI) (Methanol Institute, s.f.), definisce il metanolo come una sostanza liquida incolore (sotto condizioni normali), igroscopica e solubile in acqua la cui è composta da un solo atomo di carbonio, uno di ossigeno e quattro di idrogeno (CH_4O) ed è appartenente al gruppo organico degli alcol, essendo allora l'alcol più semplice di tutti. Grazie alla sua natura chimica è una sostanza altamente volatile e infiammabile; questo sommato alla sua miscibilità in acqua, fa sì che nel momento in cui si innesca, sia necessario per il suo spegnimento impiegare sostanze alternative all'acqua, ad esempio delle schiume.

È importante sapere che il metanolo in stato vapore ha una densità maggiore rispetto all'aria (1.1) per cui in caso di perdite, i suoi vapori tendono ad accumularsi a livelli bassi se si trovano in un luogo confinato e non si hanno dei sistemi di ventilazione. Inoltre, i dispositivi di stoccaggio di metanolo possono essere soggetti a BLEVE se per qualche motivo si riscalda esternamente oltre la temperatura di ebollizione.

Tabella 7.1: Proprietà del metanolo

Proprietà fisiche	
Densità (a 298 K)	0.786 g/cm ³
Punto di ebollizione. Teb	64.5 °C
Densità relativa del vapore	1.1
Energia minima di accensione. MIE	0.14 mJ
Temperatura di autoinnesco. AIT	460 °C
Flash point. FP	11 °C
Limite inferiore di infiammabilità. LFL	6 %
Limite superiore di infiammabilità. UFL	36 %
Classifica di infiammabilità NHPA	3

A continuazione si considerano delle diverse situazioni indesiderate che possono scatenare l'innesco del metanolo e si propongono i rispettivi alberi degli eventi, stimando le probabilità di accadimento di ciascuna delle conseguenze.

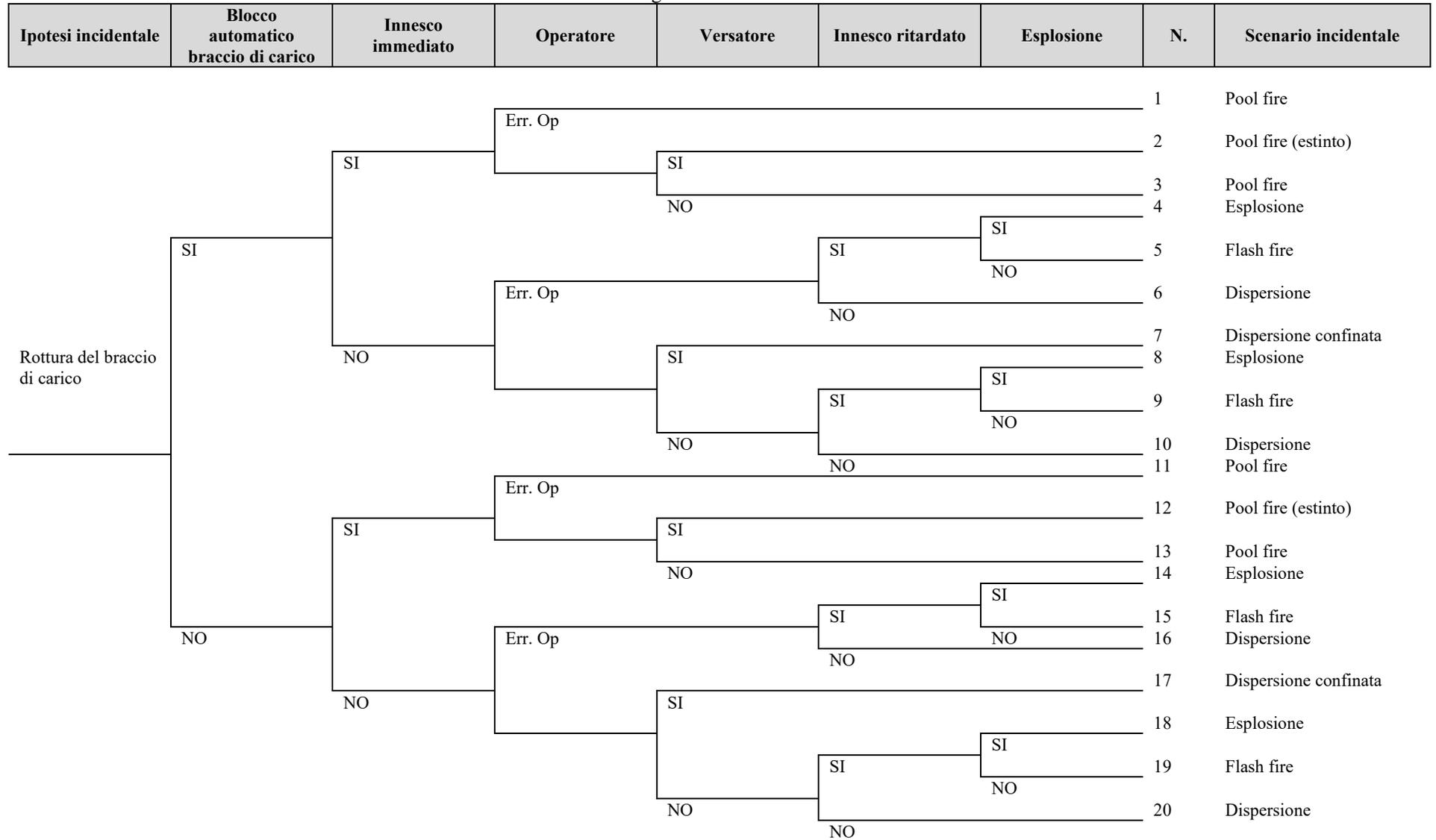
7.1.3 Ipotesi incidentale: Rilascio di metanolo in area di travaso per rottura braccio di carico

La situazione più evidente che potrebbe accadere consiste nel rilascio del materiale nell'ambiente esterno, dovuto alla rottura del sistema di trasporto dall'autobotte verso i serbatoi di stoccaggio. Questa perdita di metanolo congiunta alla presenza in vicinanza del motore dell'auto cisterna rappresenta un evidente rischio di incendio. Certamente ci sono dei fattori che incidono e determinano se effettivamente si arriva o meno all'innesco o se si ha una dispersione nell'ambiente.

Innanzitutto, come si ha già spiegato nella descrizione del sistema, si conta con un sistema di protezione automatica nell'autobotte che blocca il passaggio di sostanza nel momento in cui ci sia qualche anomalia. Se però questo sistema non interviene, si continua ad avere il rilascio in maggiore proporzione ed esiste la possibilità che si inneschi immediatamente grazie alla presenza del motore dell'ATB. A questo punto si aspetta che l'operatore a carico del processo se ne renda conto e attivi i versatori di schiuma, sia per estinguere il fuoco già presente sia per attenuare il rischio che possa ancora presentarsi l'innesco ritardato e addirittura l'esplosione.

A continuazione, nella tabella 7.2, si presenta l'albero degli eventi generale che rappresenta la situazione. Da esso si ha il punto di partenza per determinare la probabilità di accadimento di ognuna delle conseguenze che lì si presentano.

Tabella 7.2: Albero degli eventi – Rottura del braccio di carico



Nella quantificazione delle probabilità di accadimento si considerano due situazioni: nella prima si ipotizza che la rottura del braccio di carico sia parziale, mentre nella seconda la rottura è totale. Nella tabella 7.3 si riportano i dati che caratterizzano lo scenario incidentale.

Tabella 7.3: Condizioni di rilascio

Dati di input per il calcolo delle probabilità di innesco		
Temperatura (T)	25 °C	
Pressione (P)	0.5 bar	
Portata pompa (braccio di carico)	1.000 l/minuto (800 kg/minuto)	
Portata in caso di rottura parziale	240 kg/minuto	
S (forza dell'innesco) da tabella 3	0.3 (innesco da motore automezzo)	
In caso di intervento del blocco automatico del braccio di carico		
Tempo di intervento	30 s	
Quantità rilasciata	Rottura parziale	120 kg
	Rottura Totale	400 kg
In caso di mancato intervento del blocco automatico del braccio di carico		
Tempo di intervento dell'operatore da remoto	3 minuti	
Quantità rilasciata	Rottura parziale	720 kg
	Rottura Totale	2400 kg

Sulla base di queste condizioni riportate si ricavano le probabilità di innesco immediato, ritardato e di esplosione, applicando il metodo sviluppato dalla CCPS il cui è stato spiegato nel capitolo 6 di questa relazione.

Si ricorda che in questo metodo si propongono 3 livelli di approfondimento, di cui il primo non si terrà conto visto che gli algoritmi sono molto elementari e quindi si impiega in generale per fare una valutazione superficiale. Gli altri due livelli hanno delle caratteristiche di complessità più elevata e, pur avendo alcune somiglianze di calcolo tra di loro, il livello 3 tiene conto di qualche fattore in più che rende l'analisi ancora più dettagliato.

Con lo scopo di fare un'analisi di sensibilità si determinano le suddette probabilità facendo uso di entrambi gli algoritmi dei livelli 2 e 3. A seguito si vedranno i risultati per le due situazioni tenute in conto e le relative portate nei casi di rottura parziale o totale del braccio di carico. Il dettaglio della procedura matematica svolta per il loro ottenimento, lo si può trovare negli appositi allegati alla fine della presente relazione.

7.1.3.1 Algoritmi di secondo livello

Probabilità di innesco immediato POII

I fattori che incidono nel POII sono principalmente il MIE della sostanza e la sua AIT. Non essendo dipendente della quantità né del tempo di intervento, questo valore sarà lo stesso sia per il caso in cui la rottura è parziale, sia nel caso in cui è totale; ma anche quando si ha l'intervento o meno del sistema di blocco del braccio di carico.

Tabella 7.4: Probabilità di innesco immediato livello 2

Probabilità di innesco immediato		
Contributo per l'innesco statico	MIE _{adj} ¹	0.791644 mJ
	POII _{static}	6.680678 x 10 ⁻³
Contributo dell'auto ignizione:	P _{ai}	0.0
POII ₂		6.680678 x 10 ⁻³

Probabilità di innesco ritardato PODI

Il PODI, a differenza del POII calcolato in precedenza, tiene conto di tanti altri fattori come la quantità di sostanza che viene rilasciata, la forza della fonte di innesco, il tempo di esposizione, tra gli altri. Per questa ragione, si calcola un valore di PODI diverso a seconda della situazione specifica che si stia valutando.

Caso 1 → Rottura parziale del braccio di carico ed intervento del blocco automatico

Tabella 7.5: Probabilità di innesco ritardato livello 2 – caso 1

Probabilità di innesco ritardato		
Contributo della forza e durata	PODI _{S/D}	0.216756
Contributo della magnitudo:	M _{MAG}	0.414060
Contributo per il materiale	M _{MAT}	1.951582
Contributo per la temperatura	M _T	0.68813
Contributo per la localizzazione	M _{IN/OUT}	1
PODI _{Level2}		0.120529

Caso 2 → Rottura parziale del braccio di carico e mancato intervento del blocco automatico

Tabella 7.6: Probabilità di innesco ritardato livello 2 – caso 2

Probabilità di innesco ritardato		
Contributo della forza e durata	PODI _{S/D}	0.630022
Contributo della magnitudo:	M _{MAG}	0.708772
Contributo per il materiale	M _{MAT}	1.951582
Contributo per la temperatura	M _T	0.688130
Contributo per la localizzazione	M _{IN/OUT}	1
PODI _{Level2}		0.599680

Caso 3 → Rottura totale del braccio di carico ed intervento del blocco automatico

Tabella 7.7: Probabilità di innesco ritardato livello 2 – caso 3

Probabilità di innesco ritardato		
Contributo della forza e durata	PODI _{S/D}	0.216756
Contributo della magnitudo:	M _{MAG}	0.594190
Contributo per il materiale	M _{MAT}	1.951582
Contributo per la temperatura	M _T	0.688130

¹ Poiché la sostanza rilasciata è liquida è necessario fare il calcolo del MIE equivalente al vapore, ovvero il MIE_{adj}.

Contributo per la localizzazione	$M_{IN/OUT}$	1
PODI _{Level2}		0.172963

Caso 4 → Rottura totale del braccio di carico e mancato intervento del blocco automatico

Tabella 7.8: Probabilità di innesco ritardato livello 2 – caso 4

Probabilità di innesco ritardato		
Contributo della forza e durata	PODI _{S/D}	0.630022
Contributo della magnitudo:	M_{MAG}	1.017116
Contributo per il materiale	M_{MAT}	1.951582
Contributo per la temperatura	M_T	0.688130
Contributo per la localizzazione	$M_{IN/OUT}$	1
PODI _{Level2}		0.860565

I risultati del PODI per le diverse condizioni si riassumono nella tabella 7.9

Tabella 7.9: Probabilità di innesco ritardato livello 2

Probabilità di innesco ritardato				
	Rottura parziale del braccio di carico		Rottura totale del braccio di carico	
	Intervento del blocco automatico			
	Si	No	Si	No
PODI _{Level2}	0.120529	0.599680	0.172963	0.860565

Probabilità di esplosione dato un innesco ritardato POEGDI

La probabilità di esplosione dipende dalla natura della sostanza e dalla quantità rilasciata. Questo ultimo tramite un fattore di correzione M_{MAGE} che deriva dal contributo della magnitudine già considerato per l'innesco ritardato (M_{MAG}).

Tabella 7.10: Probabilità di esplosione livello 2

Probabilità di esplosione					
		Rottura parziale del braccio di carico		Rottura totale del braccio di carico	
		Intervento del blocco automatico			
		Si	No	Si	No
Contributo della sostanza	M_{CHEM}	1.0			
Contributo della magnitudo:	M_{MAGE}	0.643475	0.841886	0.770837	1.008522
Contributo per la localizzazione	$M_{IN/OUT}$	0.5			
POEGDI ₂		0.096521	0.126283	0.115626	0.151278

Come prima osservazione ottenuta dall'analisi già da questa fase di valutazione, è possibile capire l'influenza che ha sulla probabilità di innesco le dimensioni del rilascio di

sostanza, oltreché le azioni o misure protettive/correttive con cui si conta nel sistema. Nella tabella 7.9 si riportano ad esempio i risultati della probabilità di innesco ritardato allo stesso modo in cui nella tabella 7.10 le probabilità di esplosione; da lì si vede come per i diversi casi il valore differisce, e come sarebbe da aspettarsi, la predisposizione ad un innesco e/o esplosione è maggiore quando si ha rottura totale del braccio di carico e di conseguenza una quantità di sostanza rilasciata più elevata. Questo sommato al mancato intervento del sistema di blocco è il peggiore scenario che potrebbe accadere, massimizzando il rischio di arrivare ad una delle conseguenze elencate nell'albero degli eventi.

7.1.3.2 Algoritmi di terzo livello

Probabilità di innesco immediato POII

Questo livello prevede un'unica modifica per la stima del POII, la cui riguarda la temperatura effettiva che possiede la sostanza nel momento in cui viene rilasciata, poiché è possibile che subisca una variazione rispetto a quella di processo dovuti a fenomeni di espansione, cambi di pressione, ecc.

Nel caso in questione, trattandosi di un liquido a temperatura ambiente dove il passaggio dall'autobotte alla sezione di stoccaggio si dà per caduta, non si considera che ci sia un cambio rilevante della temperatura tale per cui si possa alterare il rapporto T/AIT e di conseguenza cambino i risultati precedenti.

Detto questo, il POII rimane uguale a quello che si è riportato nella tabella 7.4 per il secondo livello:

Tabella 7.11: Probabilità di innesco immediato livello 3

Probabilità di innesco immediato		
Contributo per l'innesco statico	MIE _{adj}	0.791644 mJ
	POII _{static}	6.680678 x 10 ⁻³
Contributo dell'auto ignizione:	P _{ai}	0.0
POII ₃		6.680678 x 10 ⁻³

Probabilità di Innesco Ritardato PODI

A differenza dell'innesco immediato dove non ci sono grandi modifiche, l'innesco ritardato prevede una serie di cambiamenti dal fatto che si aggiungono alcuni fattori, specialmente quelli che fanno riferimento ai sistemi di controllo e/o protezione presenti nei processi.

Tra le diverse modifiche c'è da considerare come si vede trasformata la forza a seconda dei controlli presenti sulle fonti di innesco direttamente. Questo lo si fa aggiungendo un fattore in più che agisce direttamente sul valore della forza, s.

Per tutti i casi si fa un'analisi di sensibilità su questo fattore. Allora tenendo conto che la fonte di innesco prevista è il motore dell'autoveicolo, si immagina la stima in due situazioni: considerando che non ci sia nessun tipo di controllo agendo per minimizzare il suo potenziale di provocare qualche innesco e facendo l'ipotesi che esiste un sistema di controllo il cui permetterebbe l'apertura della valvola soltanto se il motore è spento.

Una seconda modifica che si applica per il sistema è per il contributo della localizzazione. Si sa che la baia di scarico si trova all'aperto e quindi resta lo stesso valore considerato nel

secondo livello, tuttavia, è possibile variarlo tenendo conto che ci sono locazioni in cui esiste una struttura semi aperta o semi chiusa. Detto questo si valuta anche il caso in cui ci fosse un tetto nell'area dell'impianto dedicata allo stoccaggio.

Infine, la modifica più importante che si tiene in conto negli algoritmi di terzo livello è la possibilità di includere le misure di mitigazione disposte nel sistema, cioè i sistemi di protezione presenti per diminuire la probabilità di arrivare effettivamente ad un innesco una volta sia avvenuto il rilascio. La maniera come si tiene conto è includendo nel calcolo la probabilità di fallimento di tali sistemi (Failure Rate).

Nello specifico, nel caso studio si ha l'intervento dell'operatore, il quale attiva i versatori di schiuma. Siccome nell'albero degli eventi si considerano già, si deve fare attenzione al momento di riportare il risultato di non tenere conto due volte i valori, per questo si può o modificare l'albero degli eventi togliendo le due colonne corrispondenti, o lasciando il calcolo delle probabilità senza i rispettivi valori di failure rate. Nella tabella 7.12 si riportano i tassi di guasto adottati per i corrispondenti calcoli del terzo livello.

Tabella 7.12: Tassi di guasto

Evento	Tassi di guasto (occ/anno)
Rottura del braccio di carico	0.00063
Blocco automatico del braccio di carico ²	0.04
Operatore ³	0.0015
Versatore di schiuma ⁴	0.0232

Gli appositi valori correttivi si riportano man mano che si presentano i risultati, e le procedure in dettaglio sono disponibili nelle appendici allegati alla fine del documento.

Caso 1 → Rottura parziale del braccio di carico ed intervento del blocco automatico

Tabella 7.13: Probabilità di innesco ritardato livello 3 – caso 1

Probabilità di innesco ritardato					
		No controllo della fonte di innesco		Controllo della fonte di innesco	
Contributo della forza e durata	Forza, s	0.45		0.21	
	PODI _{S/D}	0.363183		0.139380	
Contributo della magnitudo:	M _{MAG}	0.414060			
Contributo per il materiale	M _{MAT}	1.951582			
Contributo per la temperatura	M _T	0.68813			
Contributo per la localizzazione	M _{IN/OUT}	Senza tetto	Con tetto	Senza tetto	Con tetto
		1	1.1	1	1.1
Misure di mitigazione	FIP	3.48 x 10 ⁻⁵			
PODI _{Level3}		7.03x10 ⁻⁶	7.73x10 ⁻⁶	2.7 x10 ⁻⁶	2.97 x10 ⁻⁶

² Si considera il tasso di guasto per il mancato intervento dell'interruttore di bassa portata FSXLL

³ Tasso di guasto per il mancato intervento operativo su segnalazione/allarme MINTOP

⁴ Corrisponde al tasso di guasto per il mancato intervento della valvola solenoide SOL

Caso 2 → Rottura parziale del braccio di carico e mancato intervento del blocco automatico

Tabella 7.14: Probabilità di innesco ritardato livello 3 – caso 2

Probabilità di innesco ritardato					
		No controllo della fonte di innesco		Controllo della fonte di innesco	
Contributo della forza e durata	Forza, s	0.45		0.21	
	PODI _{S/D}	0.793256		0.490895	
Contributo della magnitudo:	M _{MAG}	0.708772			
Contributo per il materiale	M _{MAT}	1.951582			
Contributo per la temperatura	M _T	0.68813			
Contributo per la localizzazione	M _{IN/OUT}	Senza tetto	Con tetto	Senza tetto	Con tetto
		1	1.1	1	1.1
Misure di mitigazione	FIP	3.48 x10 ⁻⁵			
PODI _{Level3}		2.627x10 ⁻⁵	2.89x10 ⁻⁵	1.626x10 ⁻⁵	1.789x10 ⁻⁵

Caso 3 → Rottura totale del braccio di carico ed intervento del blocco automatico

Tabella 7.15: Probabilità di innesco ritardato livello 3 – caso 3

Probabilità di innesco ritardato					
		No controllo della fonte di innesco		Controllo della fonte di innesco	
Contributo della forza e durata	Forza, s	0.45		0.21	
	PODI _{S/D}	0.363183		0.139380	
Contributo della magnitudo:	M _{MAG}	0.594190			
Contributo per il materiale	M _{MAT}	1.951582			
Contributo per la temperatura	M _T	0.68813			
Contributo per la localizzazione	M _{IN/OUT}	Senza tetto	Con tetto	Senza tetto	Con tetto
		1	1.1	1	1.1
Misure di mitigazione	FIP	3.48 x10 ⁻⁵			
PODI _{Level3}		1.01x10 ⁻⁵	1.11x10 ⁻⁵	3.87x10 ⁻⁶	4.26x10 ⁻⁶

Caso 4 → Rottura totale del braccio di carico e mancato intervento del blocco automatico

Tabella 7.16: Probabilità di innesco ritardato livello 3 – caso 4

Probabilità di innesco ritardato					
		No controllo della fonte di innesco		Controllo della fonte di innesco	
Contributo della forza e durata	Forza, s	0.45		0.21	
	PODI _{S/D}	0.793256		0.490895	
Contributo della magnitudo:	M _{MAG}	0.1.017116			
Contributo per il materiale	M _{MAT}	1.951582			
Contributo per la temperatura	M _T	0.68813			

Contributo per la localizzazione	M _{IN/OUT}	Senza tetto	Con tetto	Senza tetto	Con tetto
		1	1.1	1	1.1
Misure di mitigazione	FIP	3.48 x10 ⁻⁵			
PODI _{Level3}		3.77x10 ⁻⁵	4.15x10 ⁻⁵	2.33x10 ⁻⁶	2.57x10 ⁻⁶

I risultati del PODI per le diverse condizioni calcolato con il terzo livello si riassumono nella tabella 7.17.

Tabella 7.17: Probabilità di innesco ritardato livello 3

Probabilità di innesco ritardato					
		Rottura parziale del braccio di carico		Rottura totale del braccio di carico	
		Intervento del blocco automatico			
		Si	No	Si	No
No controllo della fonte di innesco	Senza tetto	7.03x10 ⁻⁶	2.627x10 ⁻⁵	1.01x10 ⁻⁵	3.77x10 ⁻⁵
	Con tetto	7.73x10 ⁻⁶	2.89x10 ⁻⁵	1.11x10 ⁻⁵	4.15x10 ⁻⁵
Controllo della fonte di innesco	Senza tetto	2.7 x10 ⁻⁶	1.626x10 ⁻⁵	3.87x10 ⁻⁶	2.33x10 ⁻⁶
	Con tetto	2.97 x10 ⁻⁶	1.789x10 ⁻⁵	4.26x10 ⁻⁶	2.57x10 ⁻⁶

Probabilità di esplosione dato un innesco ritardato POEGDI

La probabilità di esplosione calcolata con il terzo livello resta con gli stessi fattori del secondo livello e come miglioramento si aggiunge il tasso di guasto delle misure di mitigazione. Come già detto queste misure sono l'operatore che attiva il versatore di schiuma.

Tabella 7.18: Probabilità di esplosione livello 3

Probabilità di esplosione					
		Rottura parziale del braccio di carico		Rottura totale del braccio di carico	
		Intervento del blocco automatico			
		Si	No	Si	No
POEGDI ₂		0.096521	0.126283	0.115626	0.151278
FIP		3.48 x10 ⁻⁵			
POEGDI ₃		3.36 x10 ⁻⁶	4.39 x10 ⁻⁶	4.02 x10 ⁻⁶	5.26 x10 ⁻⁶

Dalla tabella 7.17 ci sono delle osservazioni interessanti da fare. Innanzitutto, lì si può vedere come si può ridurre la probabilità di avere un innesco ritardato avendo delle misure sia di controllo delle possibili fonti di innesco, sia di mitigazione sul rilascio propriamente. Prendendo ad esempio il peggiore scenario, corrispondente al caso 4 ovvero quando si ha mancato intervento del blocco automatico e una rottura totale del braccio di carico, si vede che soltanto avendo una protezione del sistema contro le fonti di innesco, la probabilità scende da una cifra significativa, passando da 3.77x10⁻⁵ a 2.33x10⁻⁶. Questo è importante poiché in tanti processi industriali, la formazione di una miscela esplosiva può essere impossibile da evitare, ma quindi in quei casi è comunque pensabile evitare il raggiungimento di una situazione di reale pericolo giacché se non si ha un'effettiva fonte di innesco non può avere luogo l'innesco.

Secondariamente, sempre analizzando i risultati della tabella 7.17, si ha un incremento nella probabilità nei casi in cui si ipotizza di avere un tetto sulla zona di stoccaggio di metanolo dell'impianto. Tale tendenza è da aspettarsi poiché il tetto blocca la dispersione della miscela nell'ambiente, aumentando la concentrazione di miscela esplosiva. Nonostante ciò, l'incremento non è così significativo tenendo conto che si sta parlando di valori dell'ordine di 10^{-5} e 10^{-6} . Certamente aumentare le barriere alla naturale dispersione della miscela, farebbe aumentare più sentitamente le probabilità, ma questo non succederà per la natura dell'area di processo che si ha come oggetto di studio.

Analogamente a quanto si ha detto sull'innesco ritardato, e prendendo sempre il caso più critico che sarebbe quello del rilascio totale senza l'intervento del blocco automatico, si vede dalla tabella 7.18 lo stesso comportamento di ridursi sentitamente, come sarebbe da aspettarsi.

In generale, le frequenze ottenute sono talmente basse, che si potrebbe dire che il sistema in complessivo è abbastanza sicuro. Nonostante questo, bisogna andare a valutare le frequenze di accadimento delle singole conseguenze riportate nell'albero degli eventi per poter dare un'opinione più giusta.

7.1.3.3 Confronto tra i livelli

Da quanto si ha visto nell'applicazione degli algoritmi per i due livelli di complessità, l'innesco immediato è uguale in tutte e due visto che non si hanno ulteriori miglioramenti. Per l'innesco ritardato invece, dal fatto che gli algoritmi includono più fattori nel terzo livello, si ha una differenza evidente nei risultati ottenuti. Nella tabella 7.19 si riassumono.

Tabella 7.19: Probabilità di innesco ritardato per i due livelli

Probabilità di innesco ritardato						
			Rottura parziale del braccio di carico		Rottura totale del braccio di carico	
			Intervento del blocco automatico			
			Si	No	Si	No
PODI_{Level2}			0.120529	0.599680	0.172963	0.860565
PODI_{Level3}	No controllo della fonte di innesco	Senza tetto	7.03×10^{-6}	2.627×10^{-5}	1.01×10^{-5}	3.77×10^{-5}
		Con tetto	7.73×10^{-6}	2.89×10^{-5}	1.11×10^{-5}	4.15×10^{-5}
	Controllo della fonte di innesco	Senza tetto	2.7×10^{-6}	1.626×10^{-5}	3.87×10^{-6}	2.33×10^{-6}
		Con tetto	2.97×10^{-6}	1.789×10^{-5}	4.26×10^{-6}	2.57×10^{-6}

Per le esplosioni si ha anche un miglioramento ed i risultati per entrambi i livelli si riporta nella tabella 7.20.

Tabella 7.20: Probabilità di esplosione per i due livelli

Probabilità di esplosione				
	Rottura parziale del braccio di carico		Rottura totale del braccio di carico	
	Intervento del blocco automatico			
	Si	No	Si	No
POEGDI ₂	0.096521	0.126283	0.115626	0.151278
POEGDI ₃	3.36 x10 ⁻⁶	4.39 x10 ⁻⁶	4.02 x10 ⁻⁶	5.26 x10 ⁻⁶

Dunque, sia per l'innesco ritardato che per le esplosioni, i risultati ottenuti differiscono notoriamente riducendosi significativamente per il terzo livello poiché, anche se esiste una probabilità iniziale considerevole, la presenza delle misure attuando sui fattori che incidono direttamente sul pericolo, fa sì che la situazione possa essere condotta tranquillamente e sottoposto agli standard di sicurezza.

È importante però ricordare il fatto che, siccome per il terzo livello si sono già considerati le contromisure ovvero l'intervento dell'operatore all'attivare i versatori di schiuma, nell'albero degli eventi non si deve tener conto di queste due colonne.

Tenendo conto di quanto si ha detto, bisogna fare un confronto più reale dei due livelli ma tenendo conto tutte le ramificazioni e valutando quanto vengono le frequenze delle singole conseguenze. Per far ciò si riporta l'albero degli eventi della tabella 7.2 con tutti i singoli risultati provenienti dai calcoli precedenti.

A continuazione, le tabelle 7.21 alla 7.24 presentano gli alberi dei guasti per i casi in cui la rottura del braccio di carico sia totale e parziale, e tenendo conto di quale livello di raffinatezza si ha considerato per i singoli calcoli delle probabilità.

Tabella 7.21: Albero degli eventi – Rottura Totale del braccio di carico. Analisi di secondo livello

Ipotesi incidentale	Blocco automatico braccio di carico	Innesco immediato	Operatore	Versatore	Innesco ritardato	Esplosione	N.	Scenario incidentale	Frequenza di accadimento	
Rottura del braccio di carico 6.3×10^{-4}	SI 9.6×10^{-1}	6.680678×10^{-3}	SI	9.985×10^{-1}	1.5×10^{-3} Err. Op	9.768×10^{-1}	1	Pool fire	6.06×10^{-9}	
							2	Pool fire (estinto)	3.94×10^{-6}	
							3	Pool fire	9.36×10^{-8}	
							4	Esplosione	1.80×10^{-8}	
							5	Flash fire	1.38×10^{-7}	
		$9.93319332 \times 10^{-1}$	NO	9.985×10^{-1}	1.5×10^{-3} Err. Op	9.768×10^{-1}	1.72963×10^{-1}	6	Dispersione	7.45×10^{-7}
								7	Dispersione confinata	5.86×10^{-4}
								8	Esplosione	2.78×10^{-7}
								9	Flash fire	2.13×10^{-6}
								10	Dispersione	1.15×10^{-5}
	NO 4×10^{-2}	6.680678×10^{-3}	SI	9.985×10^{-1}	1.5×10^{-3} Err. Op	9.768×10^{-1}	1.72963×10^{-1}	11	Pool fire	2.53×10^{-10}
								12	Pool fire (estinto)	1.64×10^{-7}
								13	Pool fire	3.90×10^{-9}
								14	Esplosione	4.89×10^{-9}
								15	Flash fire	2.74×10^{-8}
		$9.93319332 \times 10^{-1}$	NO	9.985×10^{-1}	1.5×10^{-3} Err. Op	9.768×10^{-1}	8.60565×10^{-1}	16	Dispersione	5.24×10^{-9}
								17	Dispersione confinata	2.44×10^{-5}
								18	Esplosione	7.55×10^{-8}
								19	Flash fire	4.24×10^{-7}
								20	Dispersione	8.09×10^{-8}

Tabella 7.22: Albero degli eventi – Rottura Totale del braccio di carico. Analisi di terzo livello

Ipotesi incidentale	Blocco automatico braccio di carico	Innesco immediato	Operatore	Versatore	Innesco ritardato	Esplosione	N.	Scenario incidentale	Frequenza di accadimento																			
Rottura del braccio di carico 6.3×10^{-4}	SI 9.6×10^{-1}	6.680678×10^{-3}	SI	9.985×10^{-1}	1.5×10^{-3} Err. Op	9.768×10^{-1}	1	Pool fire	6.06×10^{-9}																			
										$9.93319332 \times 10^{-1}$	NO	9.985×10^{-1}	1.5×10^{-3} Err. Op	9.768×10^{-1}	2	Pool fire (estinto)	3.94×10^{-6}											
																		SI	2.32×10^{-2}	NO	3	Pool fire	9.36×10^{-8}					
																								SI	1.15626×10^{-1}	4	Esplosione	1.16×10^{-8}
		NO	$9.93319332 \times 10^{-1}$	NO	9.985×10^{-1}	1.5×10^{-3} Err. Op	9.768×10^{-1}	6	Dispersione	8.01×10^{-7}																		
											SI	2.32×10^{-2}	NO	7	Dispersione confinata	5.86×10^{-4}												
																	SI	1.15626×10^{-1}	8	Esplosione	1.79×10^{-7}							
																						SI	8.84374×10^{-1}	9	Flash fire	1.37×10^{-6}		
																											NO	8.887931×10^{-1}
	NO 4×10^{-2}	6.680678×10^{-3}	SI	9.985×10^{-1}	1.5×10^{-3} Err. Op	9.768×10^{-1}	11	Pool fire	2.53×10^{-10}																			
										$9.93319332 \times 10^{-1}$	NO	9.985×10^{-1}	1.5×10^{-3} Err. Op	9.768×10^{-1}	12	Pool fire (estinto)	1.64×10^{-7}											
																		SI	2.32×10^{-2}	NO	13	Pool fire	3.90×10^{-9}					
																								SI	1.51278×10^{-1}	14	Esplosione	3.80×10^{-9}
		NO	$9.93319332 \times 10^{-1}$	NO	9.985×10^{-1}	1.5×10^{-3} Err. Op	9.768×10^{-1}	16	Dispersione	1.24×10^{-9}																		
											SI	2.32×10^{-2}	NO	17	Dispersione confinata	2.44×10^{-5}												
																	SI	1.51278×10^{-1}	18	Esplosione	5.87×10^{-8}							
																						SI	8.48722×10^{-1}	19	Flash fire	3.30×10^{-7}		
																											NO	3.3045977×10^{-1}

Tabella 7.23: Albero degli eventi – Rottura parziale del braccio di carico. Analisi di secondo livello

Ipotesi incidentale	Blocco automatico braccio di carico	Innesco immediato	Operatore	Versatore	Innesco ritardato	Esplosione	N.	Scenario incidentale	Frequenza di accadimento		
Rottura del braccio di carico	SI	6.680678 x 10 ⁻³	9.985 x 10 ⁻¹	1.5 x 10 ⁻³	Err. Op	9.768 x 10 ⁻¹	1	Pool fire	6.06 x 10 ⁻⁹		
							2	Pool fire (estinto)	3.94 x 10 ⁻⁶		
							3	Pool fire	9.36 x 10 ⁻⁸		
							4	Esplosione	1.05 x 10 ⁻⁸		
							5	Flash fire	9.81 x 10 ⁻⁸		
		9.93319332 x 10 ⁻¹	9.985 x 10 ⁻¹	1.5 x 10 ⁻³	Err. Op	9.768 x 10 ⁻¹	1.20529 x 10 ⁻¹	8.79471 x 10 ⁻¹	6	Dispersione	7.93 x 10 ⁻⁷
									7	Dispersione confinata	5.86 x 10 ⁻⁴
									8	Esplosione	1.62 x 10 ⁻⁷
									9	Flash fire	1.52 x 10 ⁻⁶
									10	Dispersione	1.22 x 10 ⁻⁵
	NO	6.680678 x 10 ⁻³	9.985 x 10 ⁻¹	1.5 x 10 ⁻³	Err. Op	9.768 x 10 ⁻¹	9.6521 x 10 ⁻²	11	Pool fire	2.53 x 10 ⁻¹⁰	
								12	Pool fire (estinto)	1.64 x 10 ⁻⁷	
								13	Pool fire	3.90 x 10 ⁻⁹	
								14	Esplosione	2.84 x 10 ⁻⁹	
								15	Flash fire	1.97 x 10 ⁻⁸	
		9.93319332 x 10 ⁻¹	9.985 x 10 ⁻¹	1.5 x 10 ⁻³	Err. Op	9.768 x 10 ⁻¹	5.9968 x 10 ⁻¹	4.0032 x 10 ⁻¹	16	Dispersione	1.50 x 10 ⁻⁹
									17	Dispersione confinata	2.44 x 10 ⁻⁵
									18	Esplosione	4.39 x 10 ⁻⁸
									19	Flash fire	3.04 x 10 ⁻⁷
									20	Dispersione	2.32 x 10 ⁻⁸

Tabella 7.24: Albero degli eventi – Rottura parziale del braccio di carico. Analisi di terzo livello

Ipotesi incidentale	Blocco automatico braccio di carico	Innesco immediato	Operatore	Versatore	Innesco ritardato	Esplosione	N.	Scenario incidentale	Frequenza di accadimento				
Rottura del braccio di carico	SI	6.680678 x 10 ⁻³	9.985 x 10 ⁻¹	1.5 x 10 ⁻³	Err. Op	9.768 x 10 ⁻¹	1	Pool fire	6.06 x 10 ⁻⁹				
							2	Pool fire (estinto)	3.94 x 10 ⁻⁶				
								3	Pool fire	9.36 x 10 ⁻⁸			
							4		NO	9.6521 x 10 ⁻²	4	Esplosione	7.42 x 10 ⁻⁹
								9.93319332 x 10 ⁻¹	9.985 x 10 ⁻¹	1.5 x 10 ⁻³	Err. Op	9.768 x 10 ⁻¹	9.14665517 x 10 ⁻¹
		6	NO	9.03479 x 10 ⁻¹	6	Dispersione	8.24 x 10 ⁻⁷						
			7	SI	9.6521 x 10 ⁻²	7	Dispersione confinata						
		8		NO	9.03479 x 10 ⁻¹	8	Esplosione						
			9.93319332 x 10 ⁻¹	9.985 x 10 ⁻¹	1.5 x 10 ⁻³	Err. Op	9.768 x 10 ⁻¹						
		10						NO	9.03479 x 10 ⁻¹	10	Dispersione	1.27 x 10 ⁻⁵	
	11							SI	9.6521 x 10 ⁻²	11	Pool fire	2.53 x 10 ⁻¹⁰	
		12						NO	9.03479 x 10 ⁻¹	12	Pool fire (estinto)	1.64 x 10 ⁻⁷	
	NO							6.680678 x 10 ⁻³	9.985 x 10 ⁻¹	1.5 x 10 ⁻³	Err. Op	9.768 x 10 ⁻¹	13
		14	NO	1.26283 x 10 ⁻¹	14	Esplosione	2.22 x 10 ⁻⁹						
			15	SI	8.73717 x 10 ⁻¹	15	Flash fire						1.53 x 10 ⁻⁸
		16		NO	8.73717 x 10 ⁻¹	16	Dispersione						2.00 x 10 ⁻⁹
			9.93319332 x 10 ⁻¹	9.985 x 10 ⁻¹	1.5 x 10 ⁻³	Err. Op	9.768 x 10 ⁻¹						5.327586 x 10 ⁻¹
		18						NO	1.26283 x 10 ⁻¹	18	Esplosione	3.42 x 10 ⁻⁸	
								19	SI	8.73717 x 10 ⁻¹	19	Flash fire	
		20							NO	8.73717 x 10 ⁻¹	20	Dispersione	

Dai risultati ci sono diversi aspetti da sottolineare, il primo di essi è il fatto che le si ottengono dei valori abbastanza piccoli di ordine di massimo 10^{-5} , questo è un buon inizio nella valutazione dei rischi di un sistema, ma certamente non definisce per completo i pericoli. Si ricorda che bisogna poi considerare anche il livello di danno per poter andar a fare delle conclusioni sul rischio vero e proprio. Come secondo aspetto importante è il fatto che, anche applicando i diversi livelli e tenendo diverse portate di rilascio, ci sono alcune delle conseguenze che hanno la medesima frequenza di accadimento. Si riassumono a continuazione:

Tabella 7.25: Frequenza di accadimento delle conseguenze – Parte 1

Scenario incidentale		Frequenza di accadimento			
		Rottura totale		Rottura parziale	
		Secondo livello	Terzo livello	Secondo livello	Terzo livello
1	Pool fire	6.06×10^{-9}			
2	Pool fire (estinto)	3.94×10^{-6}			
3	Pool fire	9.36×10^{-8}			
7	Dispersione confinata	5.86×10^{-4}			
11	Pool fire	2.53×10^{-10}			
12	Pool fire (estinto)	1.64×10^{-7}			
13	Pool fire	3.90×10^{-9}			
17	Dispersione confinata	2.44×10^{-5}			

Questo vuol dire che ci sono delle conseguenze nel sistema che sono indipendenti di alcune delle condizioni del processo e dell'incidente, cioè in questo caso non dipendono né dalla quantità rilasciata, né delle misure adottate per combattere tali pericoli.

Per il contrario, nella tabella 7.26 si riportano quelle che sono le conseguenze che variano la sua frequenza di accadimento poiché possono essere più o meno probabile a seconda delle salvaguardie presenti nel sistema.

Tabella 7.26: Frequenza di accadimento delle conseguenze – Parte 2

Scenario incidentale		Frequenza di accadimento			
		Rottura totale		Rottura parziale	
		Secondo livello	Terzo livello	Secondo livello	Terzo livello
4	Esplosione	1.80×10^{-8}	1.16×10^{-8}	1.05×10^{-8}	7.42×10^{-9}
5	Flash fire	1.38×10^{-7}	8.86×10^{-8}	9.81×10^{-8}	6.95×10^{-8}
6	Dispersione	7.45×10^{-7}	8.01×10^{-7}	7.93×10^{-7}	8.24×10^{-7}
8	Esplosione	2.78×10^{-7}	1.79×10^{-7}	1.62×10^{-7}	1.15×10^{-7}
9	Flash fire	2.13×10^{-6}	1.37×10^{-6}	1.52×10^{-6}	1.07×10^{-6}
10	Dispersione	1.15×10^{-5}	1.24×10^{-5}	1.22×10^{-5}	1.27×10^{-5}
14	Esplosione	4.89×10^{-9}	3.80×10^{-9}	2.84×10^{-9}	2.22×10^{-9}
15	Flash fire	2.74×10^{-8}	2.13×10^{-8}	1.97×10^{-8}	1.53×10^{-8}
16	Dispersione	5.24×10^{-9}	1.24×10^{-9}	1.50×10^{-9}	2.00×10^{-9}
18	Esplosione	7.55×10^{-8}	5.87×10^{-8}	4.39×10^{-8}	3.42×10^{-8}
19	Flash fire	4.24×10^{-7}	3.30×10^{-7}	3.04×10^{-7}	2.37×10^{-7}
20	Dispersione	8.09×10^{-8}	1.92×10^{-8}	2.32×10^{-8}	3.09×10^{-7}

7.2 *Reparto di fresatura di una resina RakuTool*

Volendo applicare i modelli anche per una polvere che ha il rischio di formare miscele esplosive con l'aria, l'azienda ITALDESIGN GIUGIARO S.p.A. propone un caso studio. ITALDESIGN GIUGIARO è un'azienda leader nel settore automobilistico che lavora strettamente con tutte le case di questo settore, coprendo le fasi di sviluppo, concetto e architettura dei veicoli, l'ingegneria di serie, prototipi, test e messa in produzione dei prodotti finali (ITALDESIGN, s.f.).

7.2.1 Descrizione del Sistema

Il sistema che si sta per valutare consiste nel reparto frese dove avviene la lavorazione di modelli in scala 1:1 degli autoveicoli, facendo uso di una resina di natura poliuretanic, la cui genera un alto contenuto di polvere disperso nell'ambiente avventi delle dimensioni lo sufficientemente piccole (intorno ai 10 μm) da poter ocasionare una situazione di pericolo di incendio e/o esplosione poiché può formare delle miscele tendenzialmente esplosive.

Per quanto riguarda allo spazio, il reparto produttivo di fresatura conta con cinque apparecchiature fresatrici avente delle caratteristiche diverse. Il reparto ha un'estensione di 730 m^2 e ogni fresatrice ha delle dimensioni di 8 m per 3.6 m. Nelle Figure 7.2 e 7.3 si può avere un'idea di come sono le apparecchiature ed il prodotto finale che si ottiene da questo processo.

La resina si prepara su un banchetto dotato di istrumenti di aspirazione dei vapori, e si modella al fine di ottenere la forma desiderata, posteriormente si indurisce ed a questo punto viene fresata mediante le apposite macchine.



Figura 7.2: Apparecchiatura reparto fresatura

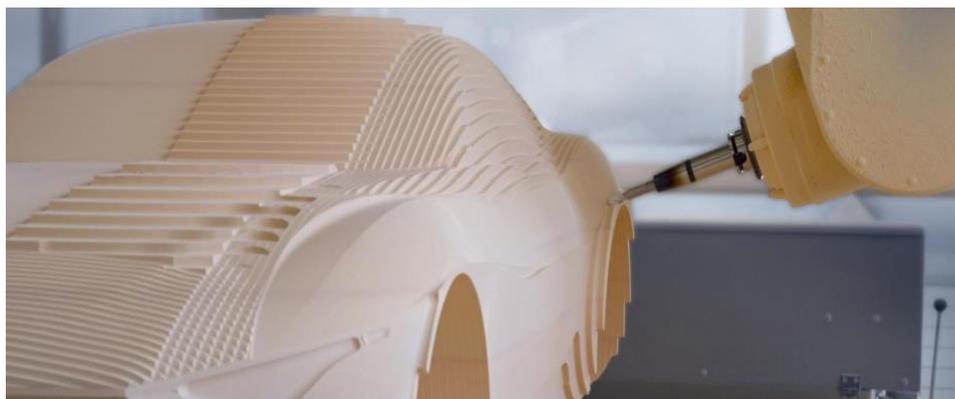


Figura 7.3: Modello in scala di un autoveicolo in resina

Nella Tabella 7.21 vengono riportate le possibili sorgenti di accensione di esplosione presenti nell'area di fresatura.

Tabella 7.27: Fonti di innesco

Check-list possibili fonti d'innesco		
Fonti d'innesco	Presente	Causa
Superfici calde	si	Surriscaldamento attrezzature
Fiamme e gas caldi	no	
Scintille di origine meccanica	si	Presenza di elementi metallici
Materiale elettrico	si	Presenza di cavi elettrici
Correnti elettriche vaganti	no	
Elettricità statica	si	
Fulmini	si	Cause naturali
Onde elettromagnetiche	no	
Radiazioni ionizzanti	no	
Ultrasuoni	no	
Compressione adiabatica	no	

7.2.2 Sostanza di interesse

La sostanza coinvolta si tratta di una resina di natura maggiormente poliuretanica e probabilmente anche cellulosa che al momento di essere messa in lavorazione nella macchina fresatrice origina una matrice pulverulenta. Inizialmente la resina si presenta in pannelli prefabbricati rettangolari, i quali vengono incollati in diverse forme e dimensioni per poter avere le specificazioni necessarie per ottenere il prodotto finale.

La resina si presenta in genere in pannelli prefabbricati rettangolari, i quali possono essere incollati in varie forme e dimensioni e di cui ne esistono varie tipologie che si differenziano per colorazione in base alla loro densità



Figura 7.4: Campione di un pannello di resina

Nella tabella 7.22 si riporta la distribuzione granulometrica della polvere, escludendo però il fatto che c'è anche un contenuto di particelle con delle dimensioni superiori (Circa un 16.4% fino ad un diametro di particella attorno ai 2000 μm).

Tabella 7.28: Dimensioni delle particelle

Misura mediante setacciatura	
Percentile %	Diametro μm
90	189.85
50	170.77
10	36.51

Da analisi di caratterizzazione fatti in precedenza dal Centro Sperimentale per la Sicurezza Industriale sulle Atmosfere Esplosive del Dipartimento di Scienza Applicata e Tecnologia DISAT del Politecnico di Torino, sono stati determinati dei parametri per definire la natura esplosiva del materiale di interesse. I risultati ottenuti sono riassunti nella Tabella 7.23:

Tabella 7.29: Parametri caratteristici polvere da resina RakuTool SB SB-0470:

Sostanza pericolosa: RESINA		
Parametro	Valore	u.m.
LEL	15	g/m^3
Grandezza media particelle	10	μm
Densità assoluta	100	Kg/m^3
MIT	330	$^{\circ}\text{C}$
Umidità	0.3	%
Pmax	7	bar
K_{st}	146	bar · m/s
Classe di esplosione	St 1	-
MIE	5	mJ

7.2.3 Ipotesi incidentale

Da quello che si ha detto sul sistema, si sa che nel normale funzionamento del processo di fresatura si genera un alto contenuto di polvere. Logicamente l'area di lavoro è dotata di strumenti di aspirazione per ridurre la concentrazione di essa nell'ambiente e quindi evitare che si raggiunga un limite tale per cui la miscela polvere-aria possa scatenare un'esplosione.

Tuttavia, anche se è presente l'aspirazione, c'è una quantità di polvere che rimane nell'area di processo e va a depositarsi sulle diverse superfici in tutta la stanza, formando degli strati di polvere che però, nel momento in cui ci sia qualche disturbo vengono disperse nell'ambiente aumentando così il rischio di formare una miscela esplosiva.

Ipotizzando allora che ci sia effettivamente un disturbo, si calcola la probabilità di innesco ed esplosione tenendo conto delle dimensioni della stanza e la quantità di polvere che verrebbe emessa in un tempo determinato del processo.

Il dettaglio dei calcoli ed i dati utilizzati si fa vedere nelle appendici.

Infine, si propone l'albero dei guasti che si vede a continuazione, poiché trattandosi di una polvere, non è possibile arrivare ad altre conseguenze come pool fire, jet fire, tank fire, ecc, ma oltretutto non essendoci delle misure di mitigazione non ci sono degli eventi da riportare in tale rappresentazione.

Tabella 7.30: Albero degli eventi

Ipotesi incidentale	Innesco immediato	Innesco ritardato	Esplosione	N.	Scenario incidentale
Disturbo degli strati di polvere	SI			1	Fire
	No	No		2	Dispersione
		Si	No	3	Fire
			Si	Si	4

7.2.3.1 Algoritmi di secondo livello

Probabilità di innesco immediato POII

Dall'applicazione del modello di secondo livello per determinare l'innesco immediato della miscela polvere – aria si ottiene che la probabilità che questo accada è nulla. Per seguire in dettaglio la procedura matematica vedere gli appendici dove si riporta passo a passo l'applicazione delle equazioni.

Tabella 7.31: Probabilità di innesco immediato

Probabilità di innesco immediato		
Contributo per l'innesco statico	MIE_{adj}	5.0 mJ
	$POII_{static}$	0
Contributo dell'auto ignizione:	P_{ai}	0
$POII_2$		0

Probabilità di innesco ritardato PODI

Tabella 7.32: Probabilità di innesco ritardato

Probabilità di innesco ritardato		
Contributo della forza e durata	PODI _{S/D}	0.0264
Contributo della magnitudo:	M _{MAG}	0.1943
Contributo per il materiale	M _{MAT}	0.1
Contributo per la localizzazione	M _{IN/OUT}	1.5
PODI _{Level2}		7.69X10 ⁻⁴

Probabilità di esplosione dato un innesco ritardato POEGDI

Tabella 7.33: Probabilità di esplosione

Probabilità di esplosione		
Contributo della sostanza	M _{CHEM}	1.0
Contributo della magnitudo:	M _{MAGE}	0.4408
Contributo per la localizzazione	M _{IN/OUT}	1.5
POEGDI ₂		0.1984

Quando si pensa ad una polvere esplosiva si immagina sempre di avere un'esplosione, nella maggioranza dei casi violenta, poiché per arrivare ad avere tale conseguenza solitamente la quantità di sostanza deve essere significativa; è difficile di immaginare che semplicemente si inneschi provocando un incendio. Nei risultati ottenuti di conseguenza si ottiene che la probabilità di avere un innesco immediato è nullo.

Per quanto riguarda all'innesco ritardato c'è già una minima probabilità ma soprattutto per le esplosioni si arriva a qualcosa di significativo.

Siccome il principale scopo dell'albero degli eventi proposto è quello di individuare le frequenze di accadimento delle conseguenze, si inseriscono i risultati per gli inneschi e si fanno i rispettivi calcoli per ottenere la quantificazione dell'albero il cui si riporta nella tabella 7.34.

Bisogna chiarire però, che in questa situazione non si ha la probabilità per il disturbo iniziale dello strato di polvere, ed è questo il maggior ostacolo che si incontra nel momento di fare una valutazione di questa natura per le sostanze polverose. Allora i risultati ottenuti finora sono condizionati quanto sia possibile che quel strato venga disturbato.

Nonostante ciò, come prima raccomandazione che si può fare dopo di applicare questa metodologia è l'adozione di sistemi di sicurezza e misure di mitigazione che possano diminuire le frequenze delle singole conseguenze e garantire uno spazio di lavoro dentro i margini della sicurezza.

Tabella 7.34: Albero degli eventi

Ipotesi incidentale	Innesco immediato	Innesco ritardato	Esplosione	N.	Scenario incidentale	Frequenza di accadimento
Disturbo degli strati di polvere	0			1	Fire	0
	SI			2	Dispersione	9.99231×10^{-1}
	1	No	8.016×10^{-1}	3	Fire	6.16×10^{-4}
	No	7.69 x 10 ⁻⁴	No	4	Esplosione	1.53×10^{-4}
		Si	1.984×10^{-1}			
			Si			

8. Analisi e discussione

In questo lavoro di tesi si sono ottenuti diversi risultati che possono analizzarsi da diversi punti di vista. Come prima cosa c'è da sottolineare come la normativa ATEX, la cui si potrebbe definire come l'insieme di tecniche, standard o metodologie che si consigliano di applicare nei processi in cui esiste il rischio di avere delle atmosfere esplosive, e si deve garantire la sicurezza sia del processo come essenzialmente delle persone che si vedono messe ogni giorno a questi contesti lavorativi.

Questa normativa allora, come sarebbe d'aspettarsi richiede di fare una adeguata valutazione dei rischi nell'ambito industriale, seguendo tutti gli step che ciò comporta. Nonostante questo requisito, ATEX non specifica quali sono le metodologie che si devono applicare per tale scopo, il che vuol dire che la scelta delle suddette resta ai professionali che svolgono detto compito.

Fare una valutazione dei rischi è una procedura che impegna tempo e risorse poiché la si deve fare con un livello di dettaglio che permetta di far capire alle persone coinvolte. In particolare, come si ha già fatto menzione, questa tesi approfondisce nello step di definizione delle probabilità di accadimento degli incidenti, in particolare dell'innesco delle sostanze infiammabili che creano degli ambienti esplosivi.

Per quanto riguarda quindi questo step in particolare, c'è da dire che tra tutte le diverse metodologie trovate nella letteratura scientifica, ci sono alcune che possono adattarsi meglio per l'analisi dei rischi delle atmosfere esplosive, mentre altre invece, sono abbastanza specifiche per situazioni o contesti che magari non si arriva a considerare nella presente.

Detto questo, la metodologia che si applica ai due casi studio spiegati nei capitoli apposti è quella proposta nel libro "Guidelines for determining the probability of ignition of a released flammable mass" (CCPS Center for Chemical Process Safety, 2014). Questa raggruppa delle considerazioni fatte in diverse metodologie facendo così, che i modelli proposti siano abbastanza affidabili e con un ampio margine di applicazione.

Con riguardo ai due casi valutati, si vede come differiscono i risultati quando ci sono o meno delle misure di protezione e mitigazione degli incidenti. Certamente non si possono paragonare entrambe le situazioni perché si tratta di sostanze piuttosto diverse, e processi in generale per niente collegati, ma comunque si sottolinea il fatto che quando si conta con tali strumenti di supporto per la sicurezza, le probabilità di avere qualche evento indesiderato o delle conseguenze maggiore si vede ridotto di qualche decina o meglio centesime.

Resta però necessario, il fatto di valutare il livello di danno che si può ottenere per poter fare delle proposte di miglioramento se necessarie, o poter affermare che i processi sono in effetti sicuri.

9. Conclusioni

Per concludere questo elaborato, innanzitutto c'è da dire che la valutazione dei rischi nell'ambito industriale è un compito indispensabile per garantire il corretto funzionamento dei processi oltreché la sicurezza delle persone che diariamente si trovano nel posto di lavoro.

La manipolazione di sostanze infiammabili che possano creare un ambiente esplosivo deve farsi con cura, implicando maggiore rigore nelle procedure, tecniche di controllo, e cercando di prevenire gli incidenti piuttosto che agire quando ci sia già sviluppato un evento indesiderato.

I due casi valutati, hanno permesso di verificare l'efficacia della metodologia per la valutazione della probabilità di innesco in due casistiche molto differenti, confrontando i risultati con quelli ottenuti dagli strumenti semi-quantitativi o empirici utilizzati tradizionalmente.

10.Riferimenti bibliografici

Anon., s.f. ITALDESIGN. [En línea] Available at: <https://www.italdesign.it/company/>[Último acceso: 2019].

ARIA s.r.l., s.f. ARIA. [En línea] Available at: <https://www.aria.srl/>

Casal, J., 2018. Evaluation of the Effects and Consequences of Major Accidents in Industrial Plants. 2nd ed. Amsterdam, Netherlands: 2018 Elsevier B.V..

CCPS Center for Chemical Process Safety, 2014. Guidelines for determining the probability of ignition of a released flammable mass. New York: American Institute of Chemical Engineers. Inc.

Center for Chemical Process Safety, s.f. American Institute of Chemical Engineers. [En línea] Available at: <https://www.aiche.org/ccps>[Último acceso: 2019].

Changlong, Z., Juncheng, J. & Xiongjun, Y., 2012. Study on Ignition Probability of Flammable Materials after Leakage Accidents. Procedia Engineering, Volumen 45, pp. 435-441.

Eckhoff, R. K., 2003. Dust Explosions in the Process Industries. 3rd ed. s.l.:Elsevier Inc..

Eckhoff, R. K., 2006. Differences and similarities of gas and dust explosions: A critical evaluation of the European 'ATEX' directives in relation to dusts. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 19(6), pp. 553-560.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION CEN, 2007. EN 1127-1:2007 Explosive Atmospheres: Explosion prevention and protection - Part 1: Basic concepts and methodology, s.l.: CEN.

European parliament and of the council, 1992. DIRECTIVE 1999/92/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL, s.l.: s.n.

Green, D. W. & Perry, R. H., 2008. Perry's Chemical Emngineers' Handbook. 8th ed. s.l.: McGraw-Hill Companies, Inc..

IEC, 2002. Standard 60079-10: Classification of hazardous areas, s.l.: s.n.

IEC, 2015. Explosive atmospheres 60079-10-1: Classification of areas – Explosive gas atmospheres, s.l.: s.n.

IEC, 2015. Explosive atmospheres 60079-10-2: Classification of areas – Explosive dust atmospheres, s.l.: s.n.

Jafari, M. y otros, 2018. Exploring inherent process safety indicators and approaches for their estimation: A systematic review. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, Volumen 52, pp. 66-80.

Khan, F., Rathnayaka, S. & Ahmed, S., 2015. Methods and models in process safety and risk management: Past, present and future. Process Safety and Environmental Protection, Issue 98, p. 116 –147.

Methanol Institute, s.f. Methanol Institute. [En línea] Available at: <https://www.methanol.org/about-methanol/> [Último acceso: 2019].

Moosemiller, M., 2011. Development of algorithms for predicting ignition probabilities and explosion frequencies. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 24(3), pp. 259-265.

National Institute of Public Health and the Environment (RIVM), 2009. Reference Manual Bevi Risk Assessments. 3.2 ed. Bilthoven: s.n.

Netherlands Organisation for applied scientific research TNO, 2005. Guidelines for quantitative risk assessment. Purple book. 3rd ed. Netherlands : PUBLICATIREEKS GEVAARLIJKE STOFFEN.

Rew, P., Spencer, H. & Daycock, J., 2000. Off-site ignition probability of flammable gases. *Journal of Hazardous Materials*, 71(1-3), pp. 409-422.

Ronza, A., Vílchez, J. & Casal, J., 2007. Using transportation accident databases to investigate ignition and explosion probabilities of flammable spills. *Journal of Hazardous Materials*, 146(1-2), pp. 106-123.

Speight, J. G., 2017. *Rules of Thumb for Petroleum Engineers*. s.l.:John Wiley & Sons.

Swuste, P. y otros, 2015. Process safety indicators, a review of literature. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, Issue 40, pp. 162 - 173.

Ullmann, F., 2000. *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*. 7th ed. Berlin : Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA..

11. Appendici

11.1 Area di scarica e stoccaggio di metanolo da un'autobotte

11.1.1 Procedura matematica per gli algoritmi di secondo livello

Probabilità di innesco immediato POII

- Contributo dell'innesco statico:

Trattandosi di una sostanza liquida è necessario fare la modifica del MIE.

$$MIE_v = 0.14 \cdot \left(\frac{10.000}{7.2519}\right)^{0.25} = 0.85313 \quad (11.1)$$

$$MIE_{adj} = 0.85313 \cdot \exp[0.0044 \cdot (60 - 77)] = 0.791644 \quad (11.2)$$

$$POII_{static} = 0.003 \cdot 7.2519^{1/3} \cdot 0.791644^{-0.6} = 6.680678 \times 10^{-3} \quad (11.3)$$

- Contributo dell'auto ignizione:

$$T/AIT = \frac{77}{859.73} = 0.08956 < 0.9 \quad (11.4)$$

$$\therefore P_{ai} = 0 \quad (11.5)$$

- Algoritmo finale per POII:

Infine, Per il POII del livello due è:

$$POII_{Level\ 2} = 0 + (1 - 0) \cdot 6.680678 \times 10^{-3} = 6.680678 \times 10^{-3} \quad (11.6)$$

Probabilità di innesco ritardato PODI

Caso 1. Rottura parziale del braccio di carico ed intervento del blocco automatico

- Contributo della forza e durata dell'esposizione alla fonte di innesco:

Per 30 secondi, ovvero mezzo minuto:

$$PODIS_{/D} = 1 - [(1 - 0.3^2) \cdot e^{-0.3(0.5)}] = 0.216756 \quad (11.7)$$

- Contributo della magnitudine del rilascio:

Siccome si dispone della quantità totale piuttosto che le dimensioni della tubazione, si fa il M_{MAG} come:

$$M_{MAG_{amount_release(liq)_parziale}} = \left(\frac{264.550265}{5.000}\right)^{0.3} = 0.414060 \quad (11.8)$$

- Contributo per il materiale:

$$M_{MAT} = 0.5 - 1.7 \log(0.14) = 1.951582 \quad (11.9)$$

- Contributo per le temperature di processo, punto di infiammabilità e punto di ebollizione:

$$M_T = 1 - \frac{(148.73 - 77)}{230} = 0.68813 \quad (11.10)$$

- Contributo per la localizzazione:

L'area in studio si trova all'esterno.

$$M_{IN/OUT} = 1 \quad (11.11)$$

➤ Algoritmo per PODI:

$$PODI_{Level\ 2} = 0.216756 \cdot 0.414060 \cdot 1.951582 \cdot 0.68813 \cdot 1 = 0.120529 \quad (11.12)$$

Caso 2 → Rottura parziale del braccio di carico e mancato intervento del blocco automatico

➤ Contributo della forza e durata dell'esposizione alla fonte di innesco:
Per 3 minuti:

$$PODI_{S/D} = 1 - [(1 - 0.3^2) \cdot e^{-0.3(3)}] = 0.630022 \quad (11.13)$$

➤ Contributo della magnitudine del rilascio:
Analogamente, cambiando la quantità rilasciata:

$$M_{MAG_{amount_release(liq)_parziale}} = \left(\frac{1587.301587}{5,000} \right)^{0.3} = 0.708772 \quad (11.14)$$

Gli altri tre modificatori rimanenti restano invariati poiché dipendono da proprietà intensive della sostanza.

➤ Algoritmo per PODI:

$$PODI_{Level\ 2} = 0.630022 \cdot 0.708772 \cdot 1.951582 \cdot 0.688130 \cdot 1 = 0.599680 \quad (11.15)$$

Caso 3 → Rottura totale del braccio di carico ed intervento del blocco automatico

➤ Contributo della forza e durata dell'esposizione alla fonte di innesco:
Per 30 secondi:

$$PODI_{S/D} = 1 - [(1 - 0.3^2) \cdot e^{-0.3(0.5)}] = 0.216756 \quad (11.16)$$

➤ Contributo della magnitudine del rilascio:
Analogamente, cambiando la quantità rilasciata:

$$M_{MAG_{amount_release(liq)_totale}} = \left(\frac{881.834215}{5,000} \right)^{0.3} = 0.594190 \quad (11.17)$$

Gli altri tre modificatori rimanenti restano invariati poiché dipendono da proprietà intensive della sostanza.

➤ Algoritmo per PODI:

$$PODI_{Level\ 2} = 0.216756 \cdot 0.594190 \cdot 1.951582 \cdot 0.688130 \cdot 1 = 0.172963 \quad (11.18)$$

Caso 4 → Rottura totale del braccio di carico e mancato intervento del blocco automatico

➤ Contributo della forza e durata dell'esposizione alla fonte di innesco:
Per 3 minuti:

$$PODI_{S/D} = 1 - [(1 - 0.3^2) \cdot e^{-0.3(3)}] = 0.630022 \quad (11.19)$$

➤ Contributo della magnitudine del rilascio:
Analogamente, cambiando la quantità rilasciata:

$$M_{MAG_{amount_release(liq)_totale}} = \left(\frac{5291.005291}{5,000} \right)^{0.3} = 1.017116 \quad (11.20)$$

Gli altri tre modificatori rimanenti restano invariati poiché dipendono da proprietà intensive della sostanza.

➤ Algoritmo per PODI:

$$PODI_{Level 2} = 0.630022 \cdot 1.017116 \cdot 1.951582 \cdot 0.688130 \cdot 1 = 0.860565 \quad (11.21)$$

Probabilità di esplosione dato un innesco ritardato POEGDI

➤ Sostanza chimica

$$M_{CHEM} = 1 \text{ (Reattività media)} \quad (11.22)$$

➤ Magnitudine del rilascio:

Caso 1 → Rottura parziale del braccio di carico ed intervento del blocco automatico

$$POEGDI M_{MAGE} = (0.414060)^{0.5} = 0.643475 \quad (11.23)$$

Caso 2 → Rottura parziale del braccio di carico e mancato intervento del blocco automatico

$$POEGDI M_{MAGE} = (0.708772)^{0.5} = 0.841886 \quad (11.24)$$

Caso 3 → Rottura totale del braccio di carico ed intervento del blocco automatico

$$POEGDI M_{MAGE} = (0.594190)^{0.5} = 0.770837 \quad (11.25)$$

Caso 4 → Rottura totale del braccio di carico ed intervento del blocco automatico

$$POEGDI M_{MAGE} = (1.017116)^{0.5} = 1.008522 \quad (11.26)$$

➤ Localizzazione

L'area di scarico e stoccaggio del metanolo si trova lontano dall'area di processo, per cui si usa il coefficiente per area remota

$$M_{IN/OUT} = 0.5 \quad (11.27)$$

➤ Algoritmo per POEGDI:

Caso 1 → Rottura parziale del braccio di carico ed intervento del blocco automatico

$$POEGDI_2 = 0.3 \cdot 1 \cdot 0.643475 \cdot 0.5 = 0.096521 \quad (11.28)$$

Caso 2 → Rottura parziale del braccio di carico e mancato intervento del blocco automatico

$$POEGDI_2 = 0.3 \cdot 1 \cdot 0.841886 \cdot 0.5 = 0.126283 \quad (11.29)$$

Caso 3 → Rottura totale del braccio di carico ed intervento del blocco automatico

$$POEGDI_2 = 0.3 \cdot 1 \cdot 0.770837 \cdot 0.5 = 0.115626 \quad (11.30)$$

Caso 4 → Rottura totale del braccio di carico ed intervento del blocco automatico

$$POEGDI_2 = 0.3 \cdot 1 \cdot 1.008522 \cdot 0.5 = 0.151278 \quad (11.31)$$

11.1.2 Procedura matematica per gli algoritmi di terzo livello

Probabilità di innesco immediato POII

Caso 1 → Rottura parziale del braccio di carico ed intervento del blocco automatico

➤ Contributo della forza e durata dell'esposizione alla fonte di innesco:

Ora però si aggiunge un fattore correttivo a seconda del controllo della fonte di innesco, il quale viene applicato direttamente al valore della forza.

Siccome la fonte di innesco prevista è il motore dell'autoveicolo, si considerano due situazioni: la prima in cui non ci sia nessun tipo di controllo agendo per minimizzare il suo potenziale di provocare qualche innesco con il fattore correttivo di 1.5, e la seconda ipotizzando di avere un sistema di sicurezza automatico che permetta l'apertura della valvola solo se il motore è spento e quindi il fattore li è di 0.7.

La forza diventa:

$$S_{No\ controllo} = 0.3 * 1.5 = 0.45 \quad (11.32)$$

$$S_{Controllo} = 0.3 * 0.7 = 0.21 \quad (11.33)$$

Per 30 secondi. ovvero mezzo minuto:

$$PODIS_{/D_{No\ controllo}} = 1 - [(1 - 0.45^2) \cdot e^{-0.45(0.5)}] = 0.363183 \quad (11.34)$$

$$PODIS_{/D_{Controllo}} = 1 - [(1 - 0.21^2) \cdot e^{-0.21(0.5)}] = 0.139380 \quad (11.35)$$

➤ Contributo della magnitudine del rilascio:

Resta invariabili rispetto a quello calcolato al livello intermedio.

$$M_{MAG_{amount_release(liq)_parziale}} = \left(\frac{264.550265}{5.000}\right)^{0.3} = 0.414060 \quad (11.36)$$

➤ Contributo per il materiale:

$$M_{MAT} = 0.5 - 1.7 \log(0.14) = 1.951582 \quad (11.37)$$

➤ Contributo per le temperature di processo. punto di infiammabilità e punto di ebollizione:

$$M_T = 1 - \frac{(148.73-77)}{230} = 0.68813 \quad (11.38)$$

➤ Contributo per la localizzazione:

Le modifiche fatte per questo contributo prevedono la quantificazione di ulteriori coefficienti.

Influenza umana: Si applica soltanto nei casi di rilasci in spazi chiusi e quando negli incidenti in cui si presume suscitato per la presenza umana.

Rilevamento e ventilazione: Non si applica per la situazione in studio poiché l'avvenimento del rilascio è in uno spazio aperto e di conseguenza non si ha la presenza di sistemi di ventilazione.

Il modificatore resta allora invariabili

$$M_{IN/OUT} = 1 \quad (11.39)$$

Se però ci fosse l'opportunità di coprire la zona di stoccaggio con un tetto, il fattore sarebbe:

$$M_{IN/OUT_{Tetto}} = 1.1 \quad (11.40)$$

➤ Misure di mitigazione:

Nell'albero degli eventi proposto si inserisce il sistema di protezione che minimizza la probabilità di innesco della sostanza.

$$FIP = FIP_{operatore} \cdot FIP_{versatori} \quad (11.41)$$

$$FIP = 1.5 \times 10^{-3} \cdot 2.32 \times 10^{-2} = 3.48 \times 10^{-5} \quad (11.42)$$

➤ Algoritmo per PODI:

$$PODI_{L3Nocon} = 0.363183 \cdot 0.414060 \cdot 1.951582 \cdot 0.68813 \cdot 1 \cdot 3.48 \times 10^{-5} = 7.03 \times 10^{-6} \quad (11.43)$$

$$PODI_{L3Con} = 0.139380 \cdot 0.414060 \cdot 1.951582 \cdot 0.68813 \cdot 1 \cdot 3.48 \times 10^{-5} = 2.70 \times 10^{-6} \quad (11.44)$$

Ipotizzando di avere il tetto

$$PODI_{L3Nocon} = 0.363183 \cdot 0.414060 \cdot 1.951582 \cdot 0.68813 \cdot 1.1 \cdot 3.48 \times 10^{-5} = 7.73 \times 10^{-6} \quad (11.45)$$

$$PODI_{L3Con} = 0.139380 \cdot 0.414060 \cdot 1.951582 \cdot 0.68813 \cdot 1.1 \cdot 3.48 \times 10^{-5} = 2.97 \times 10^{-6} \quad (11.46)$$

Caso 2 → Rottura parziale del braccio di carico e mancato intervento del blocco automatico

➤ Contributo della forza e durata dell'esposizione alla fonte di innesco:

La forza diventa:

$$S_{No\ controllo} = 0.3 \cdot 1.5 = 0.45 \quad (11.47)$$

$$S_{Controllo} = 0.3 \cdot 0.7 = 0.21 \quad (11.48)$$

Per 30 secondi. ovvero mezzo minuto:

$$PODI_{S/D_{No\ controllo}} = 1 - [(1 - 0.45^2) \cdot e^{-0.45(3)}] = 0.793256 \quad (11.49)$$

$$PODI_{S/D_{Controllo}} = 1 - [(1 - 0.21^2) \cdot e^{-0.21(3)}] = 0.490895 \quad (11.50)$$

➤ Contributo della magnitudine del rilascio:

Resta invariabili rispetto a quello calcolato al livello intermedio.

$$M_{MAG_{amount_release(liq)_parziale}} = \left(\frac{1587.301587}{5.000} \right)^{0.3} = 0.708772 \quad (11.51)$$

➤ Contributo per il materiale:

$$M_{MAT} = 0.5 - 1.7 \log(0.14) = 1.951582 \quad (11.52)$$

➤ Contributo per le temperature di processo. punto di infiammabilità e punto di ebollizione:

$$M_T = 1 - \frac{(148.73-77)}{230} = 0.68813 \quad (11.53)$$

➤ Contributo per la localizzazione:

$$M_{IN/OUT} = 1 \quad (11.54)$$

Se però ci fosse l'opportunità di coprire la zona di stoccaggio con un tetto, il fattore sarebbe:

$$M_{IN/OUT_{Tetto}} = 1.1 \quad (11.55)$$

➤ Misure di mitigazione:

Nell'albero degli eventi proposto si inserisce il sistema di protezione che minimizza la probabilità di innesco della sostanza.

$$FIP = FIP_{operatore} \cdot FIP_{versatori} \quad (11.56)$$

$$FIP = 1.5 \times 10^{-3} \cdot 2.32 \times 10^{-2} = 3.48 \times 10^{-5} \quad (11.57)$$

➤ Algoritmo per PODI:

$$PODI_{L3Nocon} = 0.793256 \cdot 0.708772 \cdot 1.951582 \cdot 0.68813 \cdot 1 \cdot 3.48 \times 10^{-5} = 2.627 \times 10^{-5} \quad (11.58)$$

$$PODI_{L3Con} = 0.490895 \cdot 0.708772 \cdot 1.951582 \cdot 0.68813 \cdot 1 \cdot 3.48 \times 10^{-5} = 1.626 \times 10^{-5} \quad (11.59)$$

Ipotizzando di avere il tetto

$$PODI_{L3Nocon} = 0.793256 \cdot 0.708772 \cdot 1.951582 \cdot 0.68813 \cdot 1.1 \cdot 3.48 \times 10^{-5} = 2.89 \times 10^{-5} \quad (11.60)$$

$$PODI_{L3Con} = 0.490895 \cdot 0.708772 \cdot 1.951582 \cdot 0.68813 \cdot 1.1 \cdot 3.48 \times 10^{-5} = 1.789 \times 10^{-5} \quad (11.61)$$

Caso 3 → Rottura totale del braccio di carico ed intervento del blocco automatico

➤ Contributo della forza e durata dell'esposizione alla fonte di innesco:

La forza diventa:

$$S_{No\ controllo} = 0.3 \cdot 1.5 = 0.45 \quad (11.62)$$

$$S_{Controllo} = 0.3 \cdot 0.7 = 0.21 \quad (11.63)$$

Per 30 secondi, ovvero mezzo minuto:

$$PODI_{S/D_{No\ controllo}} = 1 - [(1 - 0.45^2) \cdot e^{-0.45(0.5)}] = 0.363183 \quad (11.64)$$

$$PODI_{S/D_{Controllo}} = 1 - [(1 - 0.21^2) \cdot e^{-0.21(0.5)}] = 0.139380 \quad (11.65)$$

➤ Contributo della magnitudine del rilascio:

Resta invariabili rispetto a quello calcolato al livello intermedio.

$$M_{MAG_{amount_release(liq)_parziale}} = \left(\frac{881.834215}{5.000}\right)^{0.3} = 0.594190 \quad (11.66)$$

➤ Contributo per il materiale:

$$M_{MAT} = 0.5 - 1.7 \log(0.14) = 1.951582 \quad (11.67)$$

➤ Contributo per le temperature di processo, punto di infiammabilità e punto di ebollizione:

$$M_T = 1 - \frac{(148.73 - 77)}{230} = 0.68813 \quad (11.68)$$

➤ Contributo per la localizzazione:

$$M_{IN/OUT} = 1 \quad (11.69)$$

Se però ci fosse l'opportunità di coprire la zona di stoccaggio con un tetto, il fattore sarebbe:

$$M_{IN/OUT_{Tetto}} = 1.1 \quad (11.70)$$

➤ Misure di mitigazione:

Nell'albero degli eventi proposto si inserisce il sistema di protezione che minimizza la probabilità di innesco della sostanza.

$$FIP = FIP_{operatore} \cdot FIP_{versatori} \quad (11.71)$$

$$FIP = 1.5 \times 10^{-3} \cdot 2.32 \times 10^{-2} = 3.48 \times 10^{-5} \quad (11.72)$$

➤ Algoritmo per PODI:

$$PODI_{L3Nocon} = 0.363183 \cdot 0.594190 \cdot 1.951582 \cdot 0.68813 \cdot 1 \cdot 3.48 \times 10^{-5} = 1.01 \times 10^{-5} \quad (11.73)$$

$$PODI_{L3Con} = 0.139380 \cdot 0.594190 \cdot 1.951582 \cdot 0.68813 \cdot 1 \cdot 3.48 \times 10^{-5} = 3.87 \times 10^{-6} \quad (11.74)$$

Ipotizzando di avere il tetto

$$PODI_{L3Nocon} = 0.363183 \cdot 0.594190 \cdot 1.951582 \cdot 0.68813 \cdot 1.1 \cdot 3.48 \times 10^{-5} = 1.11 \times 10^{-5} \quad (11.75)$$

$$PODI_{L3Con} = 0.139380 \cdot 0.594190 \cdot 1.951582 \cdot 0.68813 \cdot 1.1 \cdot 3.48 \times 10^{-5} = 4.26 \times 10^{-6} \quad (11.76)$$

Caso 4 → Rottura totale del braccio di carico e mancato intervento del blocco automatico

➤ Contributo della forza e durata dell'esposizione alla fonte di innesco:

La forza diventa:

$$S_{No\ controllo} = 0.3 \cdot 1.5 = 0.45 \quad (11.77)$$

$$S_{Controllo} = 0.3 \cdot 0.7 = 0.21 \quad (11.78)$$

Per 30 secondi, ovvero mezzo minuto:

$$PODI_{S/D_{No\ controllo}} = 1 - [(1 - 0.45^2) \cdot e^{-0.45(3)}] = 0.793256 \quad (11.79)$$

$$PODI_{S/D_{Controllo}} = 1 - [(1 - 0.21^2) \cdot e^{-0.21(3)}] = 0.490895 \quad (11.80)$$

➤ Contributo della magnitudine del rilascio:

Resta invariabili rispetto a quello calcolato al livello intermedio.

$$M_{MAG_{amount_release(liq)_parziale}} = \left(\frac{5291.005291}{5.000} \right)^{0.3} = 1.017116 \quad (11.81)$$

➤ Contributo per il materiale:

$$M_{MAT} = 0.5 - 1.7 \log(0.14) = 1.951582 \quad (11.82)$$

➤ Contributo per le temperature di processo, punto di infiammabilità e punto di ebollizione:

$$M_T = 1 - \frac{(148.73 - 77)}{230} = 0.68813 \quad (11.83)$$

➤ Contributo per la localizzazione:

$$M_{IN/OUT} = 1 \quad (11.84)$$

Se però ci fosse l'opportunità di coprire la zona di stoccaggio con un tetto, il fattore sarebbe:

$$M_{IN/OUT_{Tetto}} = 1.1 \quad (11.85)$$

➤ Misure di mitigazione:

Nell'albero degli eventi proposto si inserisce il sistema di protezione che minimizza la probabilità di innesco della sostanza.

$$FIP = FIP_{operatore} \cdot FIP_{versatori} \quad (11.86)$$

$$FIP = 1.5 \times 10^{-3} \cdot 2.32 \times 10^{-2} = 3.48 \times 10^{-5} \quad (11.87)$$

➤ Algoritmo per PODI:

$$PODI_{L3Nocon} = 0.793256 \cdot 1.017116 \cdot 1.951582 \cdot 0.68813 \cdot 1 \cdot 3.48 \times 10^{-5} = 3.77 \times 10^{-5} \quad (11.88)$$

$$PODI_{L3Con} = 0.490895 \cdot 1.017116 \cdot 1.951582 \cdot 0.68813 \cdot 1 \cdot 3.48 \times 10^{-5} = 2.33 \times 10^{-5} \quad (11.89)$$

Ipotizzando di avere il tetto

$$PODI_{L3Nocon} = 0.793256 \cdot 1.017116 \cdot 1.951582 \cdot 0.68813 \cdot 1.1 \cdot 3.48 \times 10^{-5} = 4.15 \times 10^{-5} \quad (11.90)$$

$$PODI_{L3Con} = 0.490895 \cdot 1.017116 \cdot 1.951582 \cdot 0.68813 \cdot 1.1 \cdot 3.48 \times 10^{-5} = 2.57 \times 10^{-5} \quad (11.91)$$

Probabilità di esplosione dato un innesco ritardato POEGDI

➤ Misure di mitigazione:

$$FIP = FIP_{operatore} \cdot FIP_{versatori} \quad (11.92)$$

$$FIP = 1.5 \times 10^{-3} \cdot 2.32 \times 10^{-2} = 3.48 \times 10^{-5} \quad (11.93)$$

➤ Algoritmo per POEGDI:

$$POEGDI_3 = FIP \cdot POEGDI_2 \quad (11.94)$$

Caso 1 → Rottura parziale del braccio di carico ed intervento del blocco automatico

$$POEGDI_3 = 3.48 \times 10^{-5} \cdot 0.096521 = 3.36 \times 10^{-6} \quad (11.95)$$

Caso 2 → Rottura parziale del braccio di carico e mancato intervento del blocco automatico

$$POEGDI_3 = 3.48 \times 10^{-5} \cdot 0.1262831 = 4.39 \times 10^{-6} \quad (11.96)$$

Caso 3 → Rottura totale del braccio di carico ed intervento del blocco automatico

$$POEGDI_3 = 3.48 \times 10^{-5} \cdot 0.115626 = 4.02 \times 10^{-6} \quad (11.97)$$

Caso 4 → Rottura totale del braccio di carico ed intervento del blocco automatico

$$POEGDI_3 = 3.48 \times 10^{-5} \cdot 0.151278 = 5.26 \times 10^{-6} \quad (11.98)$$

11.2 Reparto di fresatura di una resina RakuTool

11.2.1 Procedura matematica per gli algoritmi di secondo livello

Probabilità di innesco immediato POII

➤ Contributo dell'innesco statico:

La pressione in questo caso è quella atmosferica ovvero in termini di pressione relativa sarà 0 psig, il MIE invece riportato per la polvere è 5 mJ

$$POII_{static} = 0.003 \cdot 0^{1/3} \cdot 5^{-0.6} = 0 \quad (11.99)$$

- Contributo dell'auto ignizione:

Nel caso delle polveri non si riporta la Temperatura di auto ignizione ma in linea di massima si potrebbe fare un paragone con la MIT, temperatura di minima accensione, la quale è 330°C ovvero 626 °F. Questa rispetto la temperatura di lavoro, che sarebbe quella dell'ambiente porta ad avere:

$$T/AIT < 0.9 \therefore P_{ai} = 0 \quad (11.100)$$

- Algoritmo per POII:

Dai risultati precedenti si ha che la probabilità di innesco immediato è zero.

$$POII_{Level 2} = 0 + (1 - 0) \cdot 0 = 0 \quad (11.101)$$

Probabilità di innesco ritardato PODI

- Contributo della forza e durata dell'esposizione alla fonte di innesco:

Come visto nella descrizione del sistema, ce ne sono più di una possibile sorgente di accensione, per cui si usa la sezione di "area source" dove si raggruppano tutte. Si usa il fattore S per un'area di processo di bassa densità quindi S=1, per il tempo di esposizione si fissa t= 1 secondo visto che la principale sorgente potrebbe essere una scintilla la cui sparisce subitaneamente.

$$PODIS/D = 1 - \left[(1 - 0.1^2) \cdot e^{-1\left(\frac{1}{60}\right)} \right] = 0.0264 \quad (11.102)$$

- Contributo della magnitudine del rilascio:

Tenendo conto che l'area totale della camera fresatrici è di 28.8 m² e che lo spessore massimo di polvere che si accumula è 5 mm, si ha quindi un volume totale di polvere di 0.144 m³, Da questo volume e la densità assoluta di 100 Kg/m³ si ha che la quantità di polvere eventualmente dispersa in aria sarebbe 14.4 Kg ovvero 31.75 Lb

$$M_{MAG_{amount_release(vap)}} = \left(\frac{31.75}{1,000} \right)^{0.5} = 0.1943 \quad (11.103)$$

- Contributo per il materiale:

$$M_{MAT} = 0.5 - 1.7 \log(5) = -0.6883 \quad (11.104)$$

Dato che il valore ottenuto è minore di 0.1 si prende questo limite come risultato.

- Contributo per le temperature di processo, punto di infiammabilità e punto di ebollizione:

Non applica per il vapore quindi non si terrà in considerazione per il calcolo finale.

- Contributo per la localizzazione:

L'area in studio si trova all'interno.

$$M_{IN/OUT} = 1.5 \text{ Indoor releases} \quad (11.105)$$

- Algoritmo per PODI:

$$PODI_{Level 2} = 0.0264 \cdot 0.1943 \cdot 0.1 \cdot 1.5 = 0.000769 \quad (11.106)$$

Probabilità di esplosione dato un innesco ritardato POEGDI

- Sostanza chimica

Nel caso delle polveri si ha un parametro importante che dà un'idea riguardo la reattività, la Classe di esplosione la cui dipende del valore di Kst o velocità di esplosione. Per la resina in

studio il K_{st} ha un valore di 146 bar m/s classificandosi allora in un St 1 ovvero in “esplosione moderata”. Allora si definisce una reattività media.

$$M_{CHEM} = 1.0 \text{ (Reattività media)} \quad (11.107)$$

➤ Magnitudine del rilascio:

$$POEGDI M_{MAGE} = (0.1943)^{0.5} = 0.4408 \quad (11.108)$$

➤ Localizzazione

$$M_{IN/OUT} = 1.5 \text{ Indoor} \quad (11.109)$$

➤ Algoritmo per POEGDI:

$$POEGDI_{Level2} = 0.3 \cdot 1 \cdot 0.4408 \cdot 1.5 = 0.1984 \quad (11.110)$$

12.Raccomandazioni finali e ringraziamenti

Come Ingegnere Chimico vorrei insistere nell'importanza che ha la sicurezza dei processi nella vita professionale non solo nel campo chimico-industriale ma in generale. Svolgere questo lavoro di tesi mi ha permesso di estendere le mie conoscenze in una tematica che forse tanti potrebbero riscontrare monotona e trascurabile, ma che invece è un mondo che ti estende le frontiere aldilà di quanto si insiste alcune volte nella vita accademica.

Vorrei ringraziare ai professori per condividere le loro conoscenze ogni giorno con tutti noi, e soprattutto a quelli che mi hanno fatto capire qual è il cammino che vorrei seguire.

Ringrazio specialmente alla professoressa Micaela Demichela e il gruppo SAfeR per il loro sostegno, non solo nello svolgere questo lavoro di tesi ma anche nelle difficoltà trovate nel percorso. Grazie per la pazienza e gli incoraggiamenti.