

METODOLOGIA DI VALUTAZIONE DEL RISCHIO DI ESPOSIZIONE AD ATMOSFERE POTENZIALMENTE ESPLOSIVE

Giuseppina Vignola, Daniele Coppi
Società Theos, Corso Archinti 17, 26900 Lodi
g.vignola@theotes.it

1. PREMESSA

Nell'ambito dell'applicazione del DLgs_233/03 (recepimento della DIR_99/92/CE) il Datore di Lavoro è tenuto ad effettuare la Valutazione del Rischio di esplosione (estensione degli adempimenti DLgs_626/94), ripartire in zone delle aree in cui possono formarsi le Atmosfere Esplosive ed adottare misure tecniche/organizzative per evitare formazione e ignizione di Atmosfere Esplosive e ridurre al massimo gli effetti di esplosioni.

Lo studio realizzato, prendendo spunto da modelli tipo *Fault Tree* e *Event Tree*, propone una Metodologia che permette di effettuare una Valutazione preliminare del Rischio connesso alla presenza, nel luogo di lavoro, di "atmosfere potenzialmente esplosive",

Il percorso di valutazione si svolge secondo lo schema di flusso riportato al termine di questo articolo seguendo una logica articolata in due fasi:

- la 1° fase prevede la determinazione del cosiddetto Rischio d'Area che, partendo dalla individuazione delle fonti di pericolo (sostanze), delle sorgenti di emissione, del tipo di esposizione e delle condizioni locali nonché dalla Classificazione della Zona, individuando le potenziali fonti di innesco, valuta l'effetto dei sistemi di prevenzione, protezione e contenimento¹, nonché di gestione del rischio, per definire una Classe di Rischio d'Area
- la 2° fase prevede l'individuazione delle Attività svolte nell'Area di lavoro che, partendo dal Rischio d'Area determinato, individuando di elementi critici indotti dall'attività stessa, determina il Rischio Residuo per i lavoratori tenendo in considerazione durata e frequenza dell'attività, nonché indicatori prestazionali quali ad es. Formazione specifica del lavoratore, etc.

Il criterio sviluppato permette di valutare e quantificare il rischio residuo collegato alle singole mansioni; consente di individuare con immediatezza e oggettività gli ambiti aziendali più a rischio, rimandando ad una valutazione di maggior dettaglio per le situazioni che emergono essere più critiche. Intende costituire una base di partenza per la definizione degli interventi prioritari e può essere utilizzato per valutare l'efficacia di questi ultimi nel contenimento dei livelli di rischio; infatti, l'analisi, se effettuata a ritroso, consente l'individuazione delle misure tecniche, organizzative e procedurali maggiormente necessarie ed efficaci per ridurre l'esposizione dei lavoratori.

2. ANALISI DEL RISCHIO

Una Valutazione del Rischio parte dall'individuazione delle sostanze coinvolte, considera le possibili condizioni operative, anomalie e guasti, estende l'analisi a luoghi che sono/possono essere in collegamento con quelli in cui possono formarsi Atmosfere Esplosive.

Per "atmosfere potenzialmente esplosive", si intendono miscele di sostanze infiammabili allo stato di gas, vapori, nebbie o polveri, in aria, in condizioni atmosferiche, in cui, a seguito di un innesco, la combustione si propaga all'insieme della miscela incombusta.

Per la Valutazione del Rischio il datore di lavoro valuta i rischi specifici derivanti da atmosfere esplosive, tenendo conto di fattori di rischio e misure di prevenzione e contenimento:

- probabilità e durata della presenza di atmosfere esplosive
- probabilità che le fonti di accensione siano presenti e divengano attive ed efficaci
- caratteristiche dell'impianto, sostanze utilizzate, processi e loro possibili interazioni
- entità degli effetti prevedibili
- sistemi di contenimento.

L'individuazione dei parametri (UNI EN 1127-1:2001) che permettono di determinare un indice Probabilità di accadimento dell'evento e un indice Gravità del danno presumibile porta ad identificare un Indice di Rischio:

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

¹ Questi ultimi previa valutazione dei possibili effetti.

2.1 Fattori di rischio

Per analizzare il rischio d'esplosione si identifica la capacità delle sostanze di formare con l'aria miscele potenzialmente esplosive.

La determinazione della pericolosità della sostanza in funzione delle caratteristiche chimico fisiche individua un fattore intrinseco di pericolosità fondamentale, che sarà paragonato con le modalità di stoccaggio e di utilizzo della sostanza.

2.1.1 Esplosione di polvere

Perché possa avvenire un'esplosione di polvere devono essere compresenti una serie fattori:

- presenza di polvere infiammabile
- dimensione delle particelle che permette la propagazione della fiamma
- atmosfera con ossigeno sufficiente per effettuare la combustione
- concentrazione della nube di polvere all'interno del range di esplosività
- fonte di innesco con energia sufficiente per accensione.

Le polveri combustibili sono caratterizzate da una serie di parametri, di cui alcuni rappresentativi sono:

- limite inferiore di concentrazione di infiammabilità
- energia minima di accensione (MIE)
- temperatura minima di accensione
- temperatura di autoaccensione
- temperatura di autoriscaldamento
- condizioni termiche di combustione spontanea (autocombustione per le polveri depositate)
- pressione massima di esplosione Pmax
- gradiente massimo di pressione (dP/dt)max
- concentrazione minima di ossigeno pericolosamente esplosivo (LOC)

Gravità dell'esplosione

La gravità dell'esplosione dipende da un insieme di altri fattori, tra cui:

- composizione e granulometria della polvere
- umidità e temperatura
- presenza di gas infiammabili
- volume considerato

Per individuare le classi di rischio si può partire dalle relazioni² (alternative):

$$MTAS^3 [3][4] \quad IE = SI \cdot GE \quad (2.2)$$

$$NMAB^4 [8][9][10] \quad IE = \max(SI, GE) \quad (2.3)$$

dove:

$$SI = TMA (^{\circ}C) \cdot CME (g/m^3) \cdot EMA (mJ) \quad (2.4)$$

$$GE = Pmax (bar) \cdot (dP/dt)max (bar \cdot s^{-1}) \quad (2.5)$$

Sensibilità dell'Ignizione	Gravità esplosione	Indice di esplosività	Rischio di esplosione
< 0.2	< 0.5	< 0.1	Basso
0.2 - 1	0.5 - 1	0.1 - 1	Moderato
1 - 5	1 - 2	1 - 10	Alto
> 5	> 2	> 10	Molto alto

Tabella 1: Classificazione Ministerio De Trabajo Y Asuntos Sociales, Spagna.

Partendo dai parametri caratteristici descritti si è ritenuto di individuare gli elementi che influenzavano la sensibilità di ignizione e la gravità dell'esplosione, prendendo a riferimento un database di sostanze di cui erano noti:

² Il calcolo dell'Indice di Esplosività (IE) definito dal NMAB è un metodo consolidato di valutazione della pericolosità di esplosione delle sostanze, che mette inoltre a disposizione una preziosa quantità di dati di base; il calcolo dell'Indice di Esplosività (IE) definito dal MTAS, del tutto omogeneo al precedente per parametri considerati, e simile per costruzione ed aggiunge il soddisfacimento della proprietà espressa dalla relazione (2.1).

³ Ministerio De Trabajo Y Asuntos Sociales – Spagna.

⁴ National Materials Advisory Board – USA.

- Concentrazione minima esplosiva (in g di polvere per m³ di miscela aria-polvere)
- Energia Minima di accensione (in milliJoule)
- Temperatura di autoaccensione per polveri stratificate (in °C)
- Pressione massima di esplosione (in bar)
- Gradiente massimo di crescita della pressione – (dp/dt)_{max} (in bar · s⁻¹)

Per ogni parametro si sono individuate delle classi di pericolosità, da tarare sperimentalmente, che definiscono un criterio di confronto in termini di pericolosità tra le varie sostanze.

Concentrazione minima (g/m ³)		Energia Minima di accensione (mJ)		Temperatura di autoaccensione per polveri stratificate (°C)		Pmax (bar)		dp/dt max (bar · s ⁻¹)	
8	< 10	10	< 10	10	< 100	8	> 7	8	> 500
6	≥ 10 e < 30	8	≥ 10 e < 20	8	≥ 100 e < 135	6	≥ 4 e < 7	6	≥ 300 e < 500
4	≥ 30 e < 50	6	≥ 20 e < 50	6	≥ 135 e < 200	4	≥ 2 e < 4	4	≥ 100 e < 300
2	≥ 50 e < 100	4	≥ 50 e < 100	4	≥ 200 e < 300	2	≥ 1 e < 2	2	≥ 10 e < 100
1	≥ 100	2	≥ 100 e < 500	2	≥ 300 e < 450	1	< 1	1	< 10
		1	≥ 500	1	≥ 450				

Tabella 2: Classi di pericolosità per parametro, polveri.

Gli indici caratteristici dei singoli parametri vengono sommati tra loro. Se un parametro manca viene considerato a scopo conservativo l'indice massimo relativo al gruppo. La pericolosità intrinseca viene suddivisa in classi di gravità decrescente:

Classe di pericolosità intrinseca	Range	Ip
A	21 – 44	100
B	12 – 20	10
C	5 – 11	1

Tabella 3: Classificazione, polveri.

Queste Classi sono state confrontate con quelle calcolate con i criteri più sopra riportati, attraverso una simulazione di tipo Montecarlo: sono state generate serie sintetiche di dati (equivalenti ad un totale di 50.000 sostanze) cui sono state applicate le tre classificazioni, MTAS, NMAB e Atex:

Corrispondenza % (sul totale dei dati)		Atex			
		A	B	C	tot
MTAS	Basso	0,1	10,6	2,8	13,5
	Moderato	5,1	24,1	0,1	29,2
	Alto	24,5	7,3	0,0	31,8
	Molto Alto	25,4	0,0	0,0	25,4
	tot	55,0	42,1	2,8	
varianza spiegata 84,01%					

Corrispondenza % (sul totale dei dati)		Atex			
		A	B	C	tot
NMAB	Basso	0,0	3,5	1,9	5,4
	Moderato	0,8	13,2	0,9	14,8
	Alto	7,9	15,2	0,0	23,1
	Molto Alto	46,2	10,5	0,0	56,6
	tot	54,8	42,4	2,8	
varianza spiegata 66,3%					

Tabella 4⁵: Simulazione Montecarlo.

La classificazione Atex è più conservativa⁶ di quella MTAS e all'incirca altrettanto conservativa della classificazione NMAB, ma con significative differenze nella valutazione del singolo dato. La correlazione statistica è più significativa tra Atex e MTAS che tra Atex e NMAB⁷.

2.1.2 Esplosione di gas

⁵ I totali possono non corrispondere esattamente, per via degli arrotondamenti.

⁶ Per conservativa si intende qui "severa nel classificare la pericolosità intrinseca".

⁷ La varianza spiegata della classificazione MTAS rispetto alla NMAB è risultata invece pari al 77,53%.

Il livello di rischio è relativo al tipo di sostanza, alla volatilità o tensione di vapore della sostanza, alla capacità di formare miscele infiammabili e/o esplosive, alla facilità di ignizione di tali miscele, alla densità dei vapori prodotti o dei gas, rispetto all'aria.

Tra i parametri da considerare si evidenziano quindi:

- Punto d'infiammabilità⁸
- Limiti di esplosione (LEL, UEL)
- Concentrazione limite di ossigeno (LOC)
- Energia minima di accensione (MIE)
- Temperatura minima di accensione dell'atmosfera esplosiva

Per i gas (come per le polveri), in determinate condizioni, può essere applicata la:

$$\text{Legge cubica [2][3]} \quad (dp/dt)_{\max} \cdot V^{1/3} = K_G \text{ (bar m/s)} \quad (2.6)$$

Dove V è il volume dell'ambiente considerato e K_G un parametro caratteristico, dipendente dalla sostanza, in base al quale è possibile classificare la pericolosità dei gas.

Altre classificazioni secondo categorie di rischio dipendono dai parametri sperimentali:

- spazio massimo sicuro (MESG [5][6][7]),
- rapporto fra l'energia minima di accensione del gas e quella del metano (MTV [5][6][7]).

In base ai quali si individuano le categorie di miscele pericolosamente esplosive:

- I - metano (cantieri sotterranei)
- II - gas e vapori

Categoria del pericolo di esplosione delle miscele pericolosamente esplosive	MESG [m]	MTV
II A	0,9 e più	0,8 e più
II B	dal 0,5 al 0,9	dal 0,4 al 0,8 sopra
II C	0,5 e di meno	0,45 e di meno

Tabella 5: Classificazioni MESG e MTV.

La categoria di pericolo di esplosione (II A, II B o II C) può essere determinata preliminarmente sfruttando la somiglianza della struttura chimica di sostanze già classificate (stessa serie omologa con il più piccolo peso molecolare).

Si ritiene qui di adottare un criterio analogo a quello delle polveri per individuare l'indice di rischio dei gas. Si sono individuati gli elementi che influenzano la sensibilità di ignizione e la gravità dell'esplosione, prendendo a riferimento un database di sostanze di cui erano noti:

- Frasi di rischio
- Intervallo di esplosività
- Temperatura di ebollizione (come parametro di volatilità)
- Temperatura di autoaccensione
- Densità relativa dei vapori
- Categoria del pericolo di esplosione

Per ogni parametro si sono individuate delle classi di pericolosità che definiscono un criterio di confronto in termini di pericolosità tra le varie sostanze.

Temperatura ebollizione		Densità relativa vapori		LEL		UEL		Temperatura autoaccensione °C			Categoria pericolo di esplosione		Frasi di rischio	
< 50	3	< 0,8	3	< 2	4	≥ 70	4	< 100	T6	6	II C	3	18	5
≥ 50 e < 100	2	≥ 0,8 e < 1,2	1	≥ 2 e < 3	3	≥ 30 e < 70	3	≥ 100 e < 135	T5	5	II B	2	17	4
≥ 100	1	≥ 1,2 e < 2	2	≥ 3 e < 5	2	≥ 10 e < 30	2	≥ 135 e < 200	T4	4	II A	1	12/15	3
		≥ 2	3	≥ 5	1	< 10	1	≥ 200 e < 300	T3	3			11/30	2

⁸ La classificazione delle sostanze avviene in genere con riferimento al punto di infiammabilità. Riferito ad un liquido il punto di infiammabilità è la minima temperatura alla quale esso emette vapori in quantità sufficiente per formare con l'aria, vicino alla superficie del liquido o all'interno del recipiente, una miscela che può essere accesa, cioè una miscela che si trova all'interno del *campo di infiammabilità*.

Temperatura ebollizione	Densità relativa vapori	LEL	UEL	Temperatura autoaccensione °C			Categoria pericolo di esplosione	Frase di rischio	
				≥ 300 e < 450	T2	2		10	1
				≥ 450	T1	1			

Tabella 6: Classi di pericolosità per parametro, gas.

Gli indici caratteristici dei singoli parametri vengono sommati tra loro. Se un parametro manca viene considerato, a scopo conservativo, l'indice massimo relativo al gruppo. La pericolosità intrinseca viene suddivisa in classi di gravità decrescente:

Classe di pericolosità intrinseca	Range	Ip
A	19 - 28	100
B	13 - 18	10
C	7 - 12	1

Tabella 7: Classificazione, gas.

Confrontando tra loro le sostanze si è definito l'intervallo di variabilità all'interno del quale si sono individuate tre classi di pericolosità intrinseca.

2.2 Analisi dei processi

Il processo di valutazione parte con l'individuazione della pericolosità intrinseca prendendo in esame i fattori indicati al paragrafo 2.1. Si sviluppa poi su due livelli:

- 1° LIVELLO: si determina un indice di rischio d'area⁹, indipendentemente dall'attività svolta dai lavoratori, secondo due tipologie di rischio:
 - rischio oggettivo connesso al processo → sistemi di prevenzione;
 - rischio accidentale → sistemi di protezione e contenimento.
- 2° LIVELLO: si determina l'indice di rischio connesso alla presenza, in un'area a rischio, di attività.

2.2.1 Individuazione delle Aree di lavoro

Le Aree di lavoro devono essere suddivise in funzione della tipologia e dell'omogeneità del rischio individuato, che può essere connesso alla tipologia di processo e/o all'attività svolta. Vengono analizzate le potenziali sorgenti di rischio connesse al processo ed alle condizioni ambientali determinando il Rischio d'area (che tiene conto ove presente della Classificazione delle zone pregressa).

Analizzando le attività svolte ed il rischio eventualmente indotto dallo svolgimento delle stesse si individuano:

- eventuali elementi da coordinare
- il Rischio Area/Attività che porta all'individuazione del Rischio residuo per l'operatore

2.2.2 Definizione delle fasi di analisi di processo

- Classificazione delle zone
- Individuazione delle fonti di innesco potenzialmente efficaci (connesse al processo, previste o accidentali)
- Sistemi di prevenzione e protezione adottati (elementi strutturali ed impiantistici atti a limitare la probabilità che l'evento abbia luogo)
- Sistemi di gestione del rischio (interventi procedurali e organizzativi che influenzano la probabilità di accadimento)
- Sistemi di segregazione e contenimento (elementi strutturali di contenimento e segregazione atti a limitare le conseguenze dell'evento occorso)
- Sistemi di gestione dell'emergenza (interventi impiantistici atti al contenimento dell'evento)

⁹ Tiene conto della presenza in un'area di lavoro/impianto di atmosfere potenzialmente esplosive; l'area è omogenea, in relazione al rischio individuato, per tipologia di impianto, attività, struttura.

2.2.3 Definizione delle fasi di analisi dell'attività

- Individuazione delle fonti di innesco potenzialmente efficaci (connesse all'attività, previste o accidentali)
- Sistemi di gestione del rischio (interventi procedurali e organizzativi che influenzano la probabilità di accadimento)
- Sistemi di gestione dell'emergenza (procedurali e organizzativi atti al contenimento dell'evento)

2.2.4 Quantificazione del Rischio

Come riportato al paragrafo 2 per il calcolo dell'indice di rischio si parte dal criterio secondo cui

$$IR = \text{Probabilità di accadimento} \cdot \text{Gravità di danno}$$

Per giungere alla determinazione di un indice di rischio finale si parte con l'individuazione dell'indice di rischio d'area per arrivare a determinare l'indice di rischio mansionale.

Applicando la formula citata per il calcolo dell' IR_{area} alla metodologia proposta si troverà che :

$$IR_{\text{Area}} = \text{Probabilità di accadimento} \cdot \text{Gravità di danno}$$

dove

$$\text{Probabilità di accadimento} = \text{Pericolosità intrinseca} \cdot \text{Pericolosità di processo}$$

Individuato il Rischio d'area si dovrà determinare se l'attività svolta nell'area induca un ulteriore pericolo (per utilizzo di sostanze pericolose o per tipologia di attività). Inoltre si dovrà determinare il Rischio mansionale connesso a Frequenza e durata dell'attività tenendo conto degli elementi prestazionali (formazione del personale, procedure di lavoro, etc.).

2.2.5 Individuazione della pericolosità di processo

La pericolosità connessa al processo parte da un indice attribuito alla Probabilità che si manifestino atmosfere esplosive. Adottando un approccio cautelativo (più restrittivo rispetto alle indicazioni riportate ad es. dalle norme UNI 31-35) si distinguono:

Altamente probabile (es. Zona 0, 20)	$>10^{-1}$
Probabile (es. Zona 1, 21)	$10^{-2} - 10^{-1}$
Poco probabile (es. Zona 2, 22)	$10^{-2} - 10^{-3}$
Improbabile	$10^{-3} - 10^{-4}$

Tabella 8: Probabilità che si manifestino atmosfere esplosive

Dalla probabilità che si manifestino atmosfere esplosive si passa alla determinazione della probabilità di accadimento di un evento prendendo in considerazione possibili fonti di innesco efficaci, sistemi di sicurezza e gestione del rischio.

Sempre adottando un approccio cautelativo, la presenza di fonti di innesco efficaci (sia previste che accidentali) mantiene l'indice alto mentre l'esclusione di queste porta l'indice su ordini di grandezza di 10^{-4} comunemente considerata probabilità bassa.

Pericolosità di Processo								
Probabilità che si manifestino atmosfere esplosive		Fonti di innesco potenzialmente efficaci		Sistemi di prevenzione e protezione		Sistemi di gestione del rischio		Classe di pericolosità del processo
Altamente probabile	> 10 ⁻¹	NO	< 10 ⁻⁴	SI'	10 ⁻⁴ - 10 ⁻⁵	SI'	10 ⁻⁵ - 10 ⁻⁶	BASSA
				NO	10 ⁻⁴ - 10 ⁻⁵	NO	10 ⁻⁴ - 10 ⁻⁵	MEDIO/BASSA
				NO	< 10 ⁻⁴	SI'	10 ⁻³ - 10 ⁻⁴	MEDIA
		SI'	> 10 ⁻¹	NO	10 ⁻² - 10 ⁻³	NO	10 ⁻² - 10 ⁻³	ALTA
				SI'	10 ⁻²	SI'	10 ⁻³	ALTA
				NO	10 ⁻² - 10 ⁻³	NO	10 ⁻² - 10 ⁻³	ALTA
				SI'	> 10 ⁻¹	SI'	10 ⁻¹ - 10 ⁻²	MOLTO ALTA
NO	> 10 ⁻¹	NO	> 10 ⁻¹	NO	> 10 ⁻¹	INACCETTABILE		
Probabile	10 ⁻¹ - 10 ⁻²	NO	< 10 ⁻⁵	SI'	10 ⁻⁵ - 10 ⁻⁶	SI'	< 10 ⁻⁶	REMOTA
				NO	10 ⁻⁴ - 10 ⁻⁵	NO	10 ⁻⁵ - 10 ⁻⁶	BASSA
				NO	10 ⁻⁴ - 10 ⁻⁵	SI'	10 ⁻³ - 10 ⁻⁴	MEDIA
		SI'	10 ⁻¹ - 10 ⁻²	NO	10 ⁻⁴ - 10 ⁻⁵	NO	10 ⁻⁴ - 10 ⁻⁵	MEDIO/BASSA
				SI'	10 ⁻³	SI'	10 ⁻⁴	MEDIA
				NO	10 ⁻³ - 10 ⁻⁴	NO	10 ⁻³ - 10 ⁻⁴	MEDIA
				SI'	10 ⁻¹ - 10 ⁻²	SI'	10 ⁻² - 10 ⁻³	ALTA
NO	10 ⁻¹ - 10 ⁻²	NO	10 ⁻¹ - 10 ⁻²	NO	10 ⁻¹ - 10 ⁻²	MOLTO ALTA		
Poco probabile	10 ⁻² - 10 ⁻³	NO	< 10 ⁻⁶	SI'	10 ⁻⁶ - 10 ⁻⁷	SI'	< 10 ⁻⁷	REMOTA
				NO	10 ⁻⁶ - 10 ⁻⁷	NO	10 ⁻⁶ - 10 ⁻⁷	REMOTA
				NO	10 ⁻³ - 10 ⁻⁴	SI'	10 ⁻⁵ - 10 ⁻⁶	BASSA
		SI'	10 ⁻² - 10 ⁻³	NO	10 ⁻³ - 10 ⁻⁴	NO	10 ⁻⁴ - 10 ⁻⁵	BASSA
				SI'	10 ⁻⁴	SI'	10 ⁻⁵	BASSA - MEDIO/BASSO
				NO	10 ⁻⁴ - 10 ⁻⁶	NO	10 ⁻⁴ - 10 ⁻⁶	BASSA - MEDIO/BASSO
				SI'	10 ⁻² - 10 ⁻³	SI'	10 ⁻³ - 10 ⁻⁴	MEDIA
NO	10 ⁻² - 10 ⁻³	NO	10 ⁻² - 10 ⁻³	NO	10 ⁻² - 10 ⁻³	ALTA		
Improbabile	< 10 ⁻³	NO	< 10 ⁻⁷	SI'	10 ⁻⁷ - 10 ⁻⁸	SI'	< 10 ⁻⁸	REMOTA
				NO	10 ⁻⁷ - 10 ⁻⁸	NO	10 ⁻⁷ - 10 ⁻⁸	REMOTA
				NO	10 ⁻⁴ - 10 ⁻⁵	SI'	10 ⁻⁶ - 10 ⁻⁷	REMOTA
		SI'	10 ⁻³ - 10 ⁻⁴	NO	10 ⁻⁴ - 10 ⁻⁵	NO	10 ⁻⁵ - 10 ⁻⁶	BASSA
				SI'	10 ⁻⁵	SI'	10 ⁻⁶	BASSA
				NO	10 ⁻⁵ - 10 ⁻⁶	NO	10 ⁻⁵ - 10 ⁻⁶	BASSA
				SI'	10 ⁻³ - 10 ⁻⁴	SI'	10 ⁻⁴ - 10 ⁻⁵	MEDIO/BASSA
NO	10 ⁻³ - 10 ⁻⁴	NO	10 ⁻³ - 10 ⁻⁴	NO	10 ⁻³ - 10 ⁻⁴	MEDIA		

Tabella 9: Criterio per l'individuazione della pericolosità di processo.

Le classi di probabilità che si individuano a valle di un processo di analisi ad albero di questo tipo sono paragonabili a probabilità di accadimento la cui distinzione in classi può essere del tipo di quella proposta in **Tabella 10**.

< 10 ⁻⁶	Remota	F
10 ⁻⁴ - 10 ⁻⁶	Bassa/Medio Bassa	D/E
10 ⁻³ - 10 ⁻⁴	Media	C
10 ⁻² - 10 ⁻³	Alta	B
10 ⁻² - 10 ⁻¹	Molto Alta	A
> 10 ⁻¹	Inaccettabile	-

Tabella 10: Classi di pericolosità di processo.

Per individuare la Classe di rischi d'area si collega alla pericolosità di processo, la classe di pericolosità intrinseca della sostanza. Da questi elementi emergono i possibili effetti prevedibili e la dimensione degli stessi. In funzione di questo si definiscono i sistemi di segregazione, contenimento, sfogo adottati (o da adottare per rendere la classe di rischi accettabile) oltre a Sistemi organizzativi e gestionali.

Condizioni che danno luogo a Classe di pericolosità di processo “inaccettabile” danno luogo a Classe di Rischio d’Area “inaccettabile”

Classe di Rischio d’Area

Probabilità di accadimento		Pericolosità intrinseca (IPi)			Gravità del Danno			
Pericolosità di processo		A	B	C	Sistemi di segregazione e contenimento		Sistemi di gestione dell'emergenza	
		10^2	10^1	10^0				
Inaccettabile	$>10^{-1}$				SÍ	$10^{-1} - 10^{-2}$	SÍ	$10^{-2} - 10^{-4}$
Molto Alta	$10^{-2} - 10^{-1}$						NO	$10^{-1} - 10^{-2}$
Alta	$10^{-3} - 10^{-2}$				NO	-	SÍ	$10^{-1} - 10^{-2}$
Media	$10^{-4} - 10^{-3}$						NO	-
Medio Bassa	$10^{-5} - 10^{-4}$				NO	-	SÍ	$10^{-1} - 10^{-2}$
Bassa	$10^{-6} - 10^{-5}$						NO	-
Remota	$<10^{-6}$							

IR Area	Classe di rischio d'area
$<10^{-6}$	Remoto
$10^{-6} - 10^{-5}$	Basso
$10^{-5} - 10^{-4}$	Medio Basso
$10^{-4} - 10^{-3}$	Medio
$10^{-3} - 10^{-2}$	Alto
$10^{-2} - 10^{-1}$	Molto Alto
$>10^{-1}$	Inaccettabile

Tabella 11: Classe di Rischio d’Area.

3. CRITERIO DI VALUTAZIONE ADOTTATO

Ad ogni elemento considerato nel seguito viene attribuito un indice per ognuno degli aspetti richiamati; in seguito questi valori vengono utilizzati per calcolare gli indici di rischio, come esposto nella sezione 3.3.

3.1 Analisi dell’area di lavoro

3.1.1 Tipologia di emissione (Se o Po)

Per la determinazione del rischio d’area si parte dalla Classificazione delle zone attribuendo un indice di pericolosità e di conseguenza una Classe di pericolosità intrinseca.

Il metodo permette di gestire la compresenza di sorgenti, la possibilità che si sia o meno provveduto ad effettuare la classificazione delle aree, le tipologie di emissione.

3.1.2 Fonti di innesco potenzialmente efficaci (Pfi)

Dopo aver individuato la tipologia di emissione è necessario determinare se nell’area di lavoro siano presenti fonti di potenziale innesco “efficaci”.

Il metodo gestisce le fonti Uni 1127-01, le fonti connesse al processo o all’impianto, distinguendo tra “previste” e “accidentali”¹⁰.

3.1.3 Sistemi di prevenzione e protezione adottati (Psi’, Psp’, Psg’)

Per determinare la Classe di Rischio residuo valutano gli elementi strutturali, impiantistici e gestionali che influenzano la probabilità che l’evento abbia luogo e la gravità del danno prevedibile.

Il metodo considera sistemi strutturali/di processo (sicurezza intrinseca) e/o impiantistici; per ogni voce è prevista la verifica dell’efficienza e il mantenimento.

A valle della fase di analisi di processo vengono presi in considerazione gli elementi di gestione che influenzano il rischio in maniera indiretta.

¹⁰ Nella pesatura degli indici la fonte di innesco “prevista” contiene anche la potenziale accidentalità; mentre la definizione di “accidentale” esclude il fatto che la fonte di innesco sia “prevedibile”.

3.1.4 Effetti prevedibili

A questo punto si possono individuare le conseguenze di un evento nell'ipotesi che venissero superate le barriere "preventive". Scopo di questa fase è la verifica dei sistemi di contenimento.

3.1.5 Sistemi di segregazione e contenimento (Psc')

Individuati gli elementi critici che influenzano la probabilità di accadimento, vengono presi in considerazione i fattori che influenzano la gravità del danno.

Anche in questo caso, seguendo lo stesso processo logico, vengono individuati gli elementi impiantistici e strutturali, e gli elementi gestionali che concorrono alla determinazione dell'indice di rischio finale.

3.1.6 Sistemi per la gestione dell'emergenza (Pge')

Per ogni voce è prevista la verifica dell'efficienza e il mantenimento.

3.2 Analisi dell'attività

Si individuano due situazioni (entrambe analizzate):

- l'attività svolta induce un proprio pericolo, per tipologia di attività o per utilizzo di sostanze pericolose (condizione attiva)
- l'attività non influenza l'indice di rischio d'area (condizione passiva)
- Inoltre l'attività può essere analizzata a livello di Area di lavoro/Impianto, ma anche a livello di Reparto (soprattutto il secondo caso).

Il rischio mansionale, analizzato rispetto all'area nella quale viene svolta l'attività, viene pesato attraverso dei fattori correttivi che tengono conto della Frequenza e Durata dell'attività:

Frequenza	fc'	Durata	fc''
giornaliera	1	4 - 8 ore	1
settimanale	0.2	< 4 ore	0.5
mensile	0.05	< 10 min	0.02

Tabella 12: Frequenza e durata delle attività.

3.2.1 Fonti di innesco potenzialmente efficaci (Pfi(a))

Ad ogni fonte di innesco (prevista e/o accidentale) potenzialmente efficace viene associato un indice.

3.2.2 Indicatori prestazionali (Pgr'')

Nell'analisi dell'attività, per tener conto degli aspetti legati all'operatività e agli elementi critici ad essa connessi, si sono individuati una serie di fattori raccolti sotto il nome "Sistemi di gestione del rischio" che possono influenzare direttamente o indirettamente la probabilità che un evento abbia luogo e/o la gravità delle conseguenze.

3.3 Calcolo dell'indice di Rischio

3.3.1 Rischio d'area

Esprimiamo il Rischio d'Area a partire dalla relazione:

$$IR_{Area} = \text{Log} \left(\sum_i 10^{IR_i} \right) \quad (3.1)$$

dove IR_i è l'indice di rischio attribuito all'i-esima sostanza presa in esame e viene calcolato secondo la logica sopra dettagliata attraverso il seguente algoritmo di calcolo:

$$IR_i = \text{Log } Ip_i + Po + (\text{Log} \sum P_{if} + \text{Log} \sum Se) - (\text{Log} \sum P_{si} + \text{Log} \sum P_{sp} + \text{Log} \sum P_{sg} + \text{Log} \sum P_{sc} + \text{Log} \sum P_{ge}) \quad (3.2)$$

con la convenzione che $\text{Log } 0 = 0$ e $\text{Log } 1 = 0,1$

L'indice di Rischio di Reparto è dato dalla sommatoria degli indici di rischio d'area secondo la regola:

$$IR_{\text{Reparto}}^{11} = \text{Log} \left(\sum_i 10^{IR_{\text{Area}}} \right) \quad (3.3)$$

3.3.2 Rischio residuo ed Esposizione mansionale

L'indice di rischio residuo è rappresentato dalla combinazione del Rischio indotto dall'Attività (*m-esima*) svolta da una certa mansione e del Rischio d'Area (*p-esima*) e viene calcolato attraverso il seguente algoritmo di calcolo:

$$IR_{m,p}^{12} = \text{Log}[fc' \cdot fc'' (10^{IR_{\text{Area}}_p} + 10^{IR_{\text{Attività}}_m})] \quad (3.4)$$

dove

$$IR_{\text{Attività}}_m = \text{Log} \left(\sum_n 10^{IR_{n,\text{Attività}}_m} \right) \quad (3.5)$$

e dove $IR_{n,\text{Attività}}_m$ è l'indice di rischio attribuito all'*n*-esima sostanza utilizzata/prodotta durante lo svolgimento di una Attività ed è dato dalla regola:

$$IR_{n,\text{Attività}}_m = (Ip_n + \text{Log}\Sigma Pfi(a) - \text{Log}\Sigma Psg(a)) \quad (3.6)$$

IR_R	Classe di rischio residuo	CR_r
$<10^{-6}$	Remoto	F
$10^{-6} - 10^{-5}$	Basso	E
$10^{-5} - 10^{-4}$	Medio Basso	D
$10^{-4} - 10^{-3}$	Medio	C
$10^{-3} - 10^{-2}$	Alto	B
$10^{-2} - 10^{-1}$	Molto Alto	A
$>10^{-1}$	Inaccettabile	N.A.

Tabella 13: Indice di rischio residuo.

L'Indice di Esposizione Mansionale, che a scopo cautelativo può essere calcolato come il massimo $IR_{R_{m,p}}$ individuato per la mansione, può essere calcolato tenendo conto di tutte le Attività attribuite alla mansione e delle Aree nelle quali queste vengono svolte secondo la seguente relazione:

$$IE_M = \text{Log} \left(\sum_{m,p} 10^{IR_{R_{m,p}}} \right) \quad (3.7)$$

4. CONCLUSIONI

Il metodo proposto si colloca nel citato ambito degli strumenti concettuali per la valutazione del rischio residuo collegato alle mansioni; consente di effettuare la valutazione in maniera ragionevolmente approfondita senza richiedere una quantità di informazioni sproporzionata. Data la ricchezza di *check-list* e la forma molto strutturata può essere applicato da chiunque possieda un'adeguata conoscenza della realtà produttiva specifica e delle basi dei processi di valutazione dei rischi. Per le situazioni più significative resta ovviamente necessaria una valutazione di maggior dettaglio.

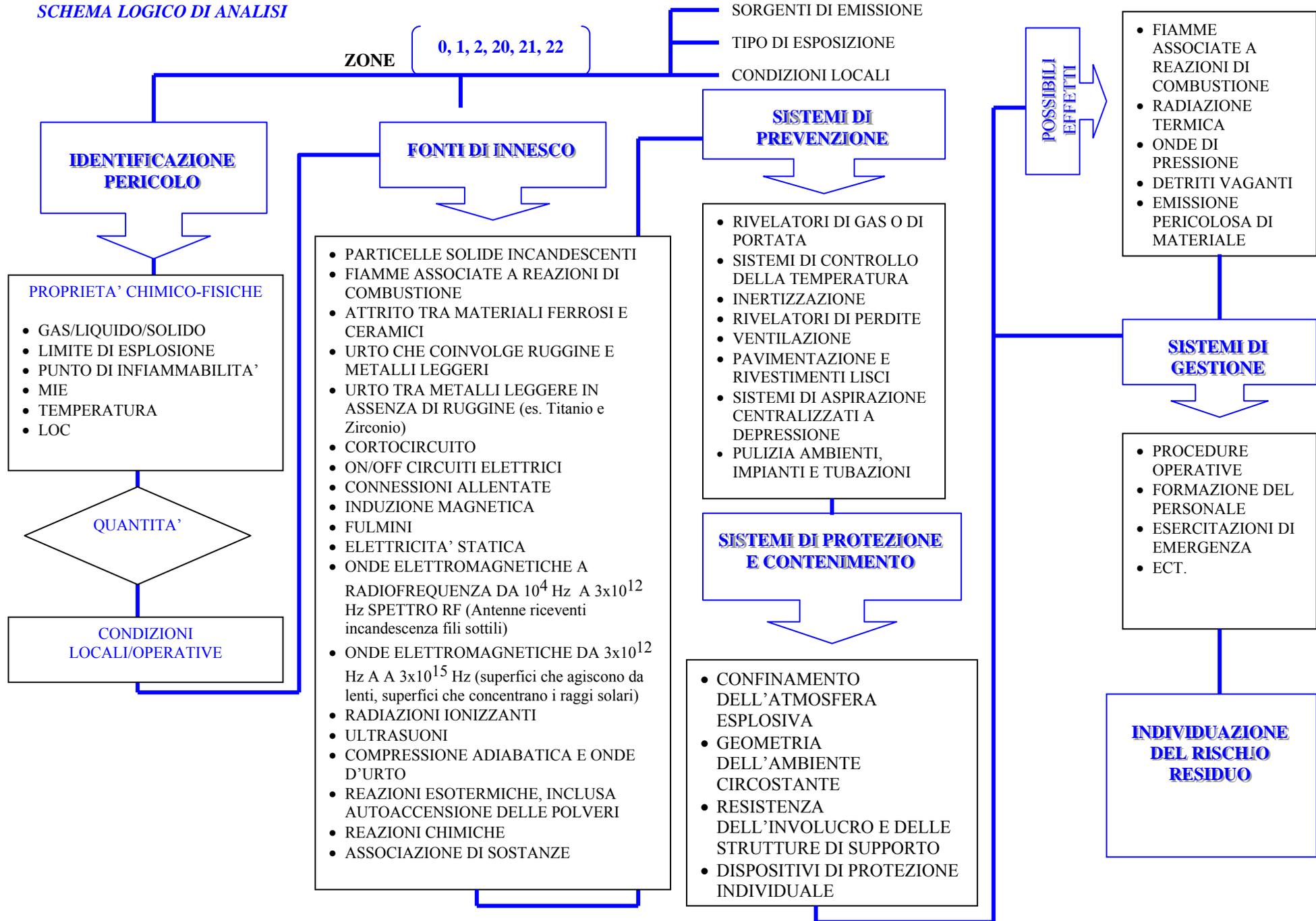
L'analisi consente di evidenziare gli ambiti aziendali più a rischio e facilita l'individuazione delle misure tecniche, organizzative e procedurali più indicate per ridurre i livelli di rischio.

Allo stato attuale di validazione non sono emerse particolari tendenze del modello alla polarizzazione dei risultati, che appaiono anzi coprire con completezza il range di valori disponibili e rispecchiare i giudizi espressi in casi specifici da professionisti del settore. I valori dei singoli parametri potranno comunque essere progressivamente tarati su una casistica sempre più significativa.

¹¹ Con la definizione Reparto si intende convenzionalmente un luogo fisicamente separato dalle aree circostanti, che contiene una o più Aree di lavoro.

¹² E' possibile definire un Indice di Esposizione di reparto che, con la stessa logica tenga conto delle Aree di lavoro presenti nel reparto e delle attività svolte da terzi

SCHEMA LOGICO DI ANALISI



5. BIBLIOGRAFIA

- [1] José Luis Villanueva Muñoz, Instalaciones de recogida de polvos combustibles. Control del riesgo de explosión Combustible dust systems. Control of explosions hazard. Canalisation de poussières combustibles. Contrôle du risque d'explosion, *Centro de Investigación y Asistencia Técnica - Barcelona*, NTP 29
- [2] Bernardo Méndez Bernal, Emilio Turmo Sierra, Sistemas supresores de explosión (I): fundamentos teóricos y medios de extinción, Systèmes de suppression d'explosion, Explosion suppression systems, *Centro Nacional de Condiciones de Trabajo*, NTP 402
- [3] Bernardo Méndez Bernal, Emilio Turmo Sierra, Sistemas supresores de explosión (II): factores de diseño y aplicaciones prácticas, Systèmes de suppression d'explosion, Explosion suppression systems, *Centro Nacional de Condiciones de Trabajo*, NTP 403
- [4] Emilio Turmo Sierra, Parámetros débiles para el venteo de alivio de explosiones (I), *Centro Nacional de Condiciones de Trabajo*
- [5] Occupational safety standards system. Explosive mixtures. Classification and test methods, GOST_12.1.011-78 STANDARD_SEV 2775-80
- [6] System of standards on safety at work. Fire and explosion hazard of combustible dusts. General requirements, Hazardous Area Classification / Flameproofing, GOST_12.1.041-83
- [7] Occupational safety standards system. Fire and explosion hazard of substances and materials. Nomenclature of indices and methods of their determination, GOST_12.1.044-89
- [8] National Materials Advisory Board, Classification of Combustible Dusts in Accordance with the National Electrical Code, *National Academy of Sciences*, NAS-NMAB_353-3-80
- [9] National Materials Advisory Board, Classification of Dusts Relative to Electrical Equipment in Class II Hazardous Locations, *National Academy of Sciences*, NAS-NMAB_353-4-82
- [10] National Materials Advisory Board, Matrix of Combustion-Relevant Properties and Classification of Gases, Vapors, and Selected Solids, *National Academy of Sciences*, NAS-NMAB_353-1-79

6. ELENCO DEI SIMBOLI

CME	Concentrazione Minima Esplosiva
$(dp/dt)_{max}$	Gradiente massimo di crescita della pressione
EMA	Energia Minima di Accensione
fc'	parametro di durata della mansione
fc''	parametro di frequenza della mansione
GE	Gravità dell'Esplosione
IE	Indice di Esplosività
Ip_i	indice di pericolo attribuito alla i-esima sostanza presa in esame presente nell'area o connessa al processo
Ip_n	indice di pericolo attribuito alla n-esima sostanza presa in esame attribuibile all'attività svolta
IR_{Area_p}	Indice di Rischio per Area di lavoro
$IR_{Attività_m}$	Indice di Rischio per l'attività
IR_i	Indice di Rischio attribuito all'i-esima sostanza
IE_M	Indice di Esposizione mansionale
$IR_{n,Attività}$	Indice di Rischio attribuito all'n-esima sostanza, per un'attività
$IR_{Rm,p}$	Indice di Rischio residuo
MTAS	Ministerio De Trabajo Y Asuntos Sociales – Spagna.
NMAB	National Materials Advisory Board – USA.
P_{if}	indice attribuito alla i-esima fonte di innesco
$P_{if}(a)$	indice attribuito alla i-esima fonte di innesco dovuta all'attività svolta
$P_{ige'}$	parametro connesso ai sistemi per gestione dell'emergenza
$P_{igr''}$	parametro connesso ai sistemi di gestione del rischio, connessi all'attività
$P_{isc'}$	parametro che tiene conto dei sistemi di contenimento e segregazione presenti
$P_{isg'}$	parametro connesso ai sistemi di gestione del rischio d'area
$P_{isi'}$	parametro che tiene conto degli elementi di sicurezza intrinseca
$P_{isp'}$	parametro che tiene conto dei sistemi di prevenzione e protezione adottati
P_{max}	Pressione massima di esplosione
P_o	indice attribuito alla zona
Se	indice che tiene conto della compresenza di più alle sorgenti di emissione nella stessa area
SI	Sensibilità all'Ignizione
TMA	Temperatura Minima di Accensione