



## **MISURE PER PREVENIRE LA FORMAZIONE DI ATMOSFERE ESPLOSIVE**

### **QUADERNO TECNICO**

## **INERTIZZAZIONE AFFIDABILITÀ DEL SISTEMA DI MONITORAGGIO E CONTROLLO**

### **Esempio**

Autore:

Tecnico della Prevenzione  
*dott. Mauro Baldissin*

Responsabile scientifico:

Dirigente Ingegnere  
*dott. ing. Massimo Rho*

Documento di proprietà di ATS della Città Metropolitana di Milano. Non può essere riprodotto o diffuso in parte o per intero da terzi senza autorizzazione scritta del Direttore Generale.

## INDICE

1.	PREMESSA	3
2.	INERTIZZAZIONE	5
2.1	METODI DI INERTIZZAZIONE	8
2.1.1	Inertizzazione in pressione (pressure swing inerting)	8
2.1.2	Inertizzazione sottovuoto (vacuum swing inerting)	8
2.1.3	Inertizzazione con flussaggio (flow through inerting)	8
2.2	SISTEMA DI MONITORAGGIO E CONTROLLO	9
2.2.1	Margini di sicurezza	10
3.	VALUTAZIONE DEL RISCHIO DI ESPLOSIONE	11
3.1	GENERALITÀ SUI DISPOSITIVI DI SICUREZZA UTILIZZATI PER LA PROTEZIONE DI IMPIANTI INDUSTRIALI	11
3.2	CRITERIO DI VALUTAZIONE DEL RISCHIO	12
4.	ESEMPIO	15
4.1	DATI DI INGRESSO	15
4.2	PRIME CONSIDERAZIONI	16
4.3	VALUTAZIONE DEL RISCHIO DI ESPLOSIONE ALLO STATO DI FATTO	18
4.4	INERTIZZAZIONE DELLA MACCHINA	19
4.4.1	Cicli di vuoto	20
4.4.2	Aggiunta delle polveri	20
4.5	REALIZZAZIONE DEL SISTEMA DI MONITORAGGIO E CONTROLLO	23
4.5.1	Eliminazione delle scariche elettrostatiche che possono essere presenti nel normale esercizio [CEI CLC/TR 60079-32-1]	24
4.5.2	Valutazione del livello di integrità della sicurezza	26
4.5.2.1	Lavaggio iniziale - Ipotesi 1	26
4.5.2.2	Lavaggio iniziale - Ipotesi 2	29
4.5.2.3	Esercizio - Ipotesi 1	30
4.5.2.4	Esercizio - Ipotesi 2	31
4.5.2.5	Esercizio - Ipotesi 3	34
4.5.2.6	Esercizio - Ipotesi 4	35
4.6	ANALISI E VALUTAZIONE DELLE SORGENTI DI ACCENSIONE	37
4.6.1	Analisi dei requisiti essenziali di sicurezza generali	37
4.6.2	Analisi delle sorgenti di accensione interne (I) ed esterne (E) della macchina	39
4.6.3	Valutazione delle sorgenti di accensione	45
4.7	VALUTAZIONE FINALE DEL RISCHIO DI ESPLOSIONE	45
5.	RISCHI CONNESSI ALL'UTILIZZO DELL'AZOTO - CENNI	46
5.1	ESEMPIO DI CALCOLO	48
ALLEGATO A	PIANIFICAZIONE DELLE MISURE TECNICHE ED ORGANIZZATIVE	50
ALLEGATO B	ESEMPIO DI PERMESSO DI LAVORO PER LAVORI A CALDO	51
ALLEGATO C	BIBLIOGRAFIA	52

## 1. PREMESSA

Il Titolo XI del DLgs 09.04.2008 n. 81 *Testo unico sulla salute e sicurezza sul lavoro*, disciplina i provvedimenti che le aziende devono adottare per la protezione dei lavoratori contro i rischi da atmosfere esplosive, ovvero “miscele con l'aria, a condizioni atmosferiche, di sostanze infiammabili allo stato di gas, vapori, nebbie o polveri in cui, dopo accensione, la combustione si propaga nell'insieme della miscela incombusta”.

Tale obbligo specifico deriva dal recepimento della direttiva europea (sociale) 1999/92/CE<sup>1</sup> (DLgs 12.06.2003 n. 233).

Secondo la norma i datori di lavoro devono in particolare:

- verificare l'esistenza sul luogo di lavoro di sostanze infiammabili e/o polveri combustibili e, se esistenti, e se in grado di originare atmosfere esplosive con effetti non trascurabili,
- ripartire in “zone” le aree con pericolo di esplosione in conformità all'Allegato XLIX;
- applicare le prescrizioni di sicurezza previste dall'Allegato L alle attrezzature e ai luoghi di lavoro;
- segnalare, ove ritenuto necessario, i punti di accesso alle aree in cui possono formarsi atmosfere esplosive con il segnale di avvertimento indicato nell'Allegato LI;
- predisporre il documento sulla protezione contro le esplosioni;
- in presenza di più imprese, coordinarne l'attività ai fini della sicurezza (l'obiettivo, le misure e le modalità di attuazione di tale coordinamento vanno specificate nel documento sulla protezione contro le esplosioni);
- segnalare le installazioni elettriche nelle aree classificate come zone 0, 20, 1 o 21 all'ATS/ASL/ARPA ai fini della loro omologazione e farne effettuare la verifica ogni due anni da parte della stessa ATS/ASL/ARPA o da parte di organismi in possesso di una specifica abilitazione rilasciata dal Ministero dello sviluppo economico.

Sempre in tema di atmosfere esplosive, la costruzione, l'immissione sul mercato e la messa in servizio di prodotti destinati all'uso in aree a rischio di esplosione è assoggettata alla direttiva europea (di prodotto) 2014/34/UE<sup>2</sup> (DLgs 19.05.2016 n. 85), la quale ha sostituito la direttiva 1994/9/CE<sup>3</sup> (DPR 23.03.1998 n. 126) dal 20.04.2016.

Le direttive europee sopra citate sono più note come direttive “ATEX” (acronimo francese ATmosphères EXplosives).

Tra le misure di prevenzione dell'esplosione che il datore di lavoro può adottare vi è l'inertizzazione, la quale consiste nella sostituzione parziale o totale dell'ossigeno (comburente) contenuto nell'aria presente nel sistema da proteggere contro l'esplosione con un gas inerte, fino a ridurre il contenuto al disotto di una data concentrazione alla quale l'esplosione non si può verificare.

La tecnica dell'inertizzazione è una valida misura di prevenzione contro la formazione di atmosfere esplosive **ma richiede un'attenta realizzazione del sistema che ne monitora e controlla l'efficacia.**

Il presente quaderno tecnico vuole evidenziare l'importanza, in termini di sicurezza, di tale sistema di monitoraggio e controllo, attraverso un esempio di analisi e valutazione dei rischi proposto ai datori di lavoro di piccole e medie imprese che utilizzano o intendono utilizzare la tecnica dell'inertizzazione.

---

<sup>1</sup> Prescrizioni minime per il miglioramento della tutela della sicurezza e della salute dei lavoratori che possono essere esposti al rischio di atmosfere esplosive.

<sup>2</sup> Apparecchi e sistemi di protezione destinati ad essere utilizzati in atmosfera potenzialmente esplosiva.

<sup>3</sup> Dal punto di vista tecnico, le direttive 94/9/CE e 2014/34/UE sono sostanzialmente uguali; cambiano invece, e diventano più stringenti, le regole per gli “Operatori Economici” della filiera (fabbricanti, rappresentanti autorizzati, importatori, distributori).

Sono inoltre fornite alcune informazioni in merito ai pericoli intrinseci all'utilizzo dell'azoto.

Le considerazioni svolte sono frutto di esperienze in attività di vigilanza inerenti la legislazione in materia di protezione da atmosfere esplosive e di sintesi della letteratura tecnica reperita.

Quanto sviluppato riveste carattere generale e non cogente. Le indicazioni fornite costituiscono una possibile interpretazione delle norme tecniche e prassi applicabili, alle quali occorre comunque riferirsi.

In quanto principale destinatario degli obblighi di legge in materia di salute e sicurezza sul luogo di lavoro, il datore di lavoro deve valutare l'idoneità alla propria specifica attività lavorativa dell'esempio proposto che è didattico e indicativo delle sole situazioni considerate o di situazioni assimilabili.

ATS Città Metropolitana di Milano

## 2. INERTIZZAZIONE

Come noto, affinché un gas o vapore infiammabile<sup>4</sup> oppure una polvere combustibile<sup>5</sup> in miscela con l'aria dia luogo a un'esplosione, occorre che si verifichino contemporaneamente le seguenti condizioni:

- la sostanza infiammabile<sup>6</sup> si trovi entro i limiti (campo) d'infiammabilità<sup>7</sup>;
- sia presente una qualunque sorgente di accensione efficace<sup>8</sup> (es. di origine meccanica, elettrica, elettrostatica).

L'energia di accensione di gran parte dei gas e vapori infiammabili è molto bassa, nell'ordine di 0,2 mJ<sup>9</sup>, mentre nelle polveri oscilla (in funzione del materiale e della granulometria) tra 1 mJ e 10.000 mJ.

È quindi chiaro come, in particolare in presenza di gas o vapori infiammabili, sia molto difficile escludere ogni possibile causa di accensione aprioristicamente ma si debba agire sul primo dei due elementi; occorre cioè assicurarsi che la sostanza infiammabile non si trovi mai miscelata in aria entro i limiti d'infiammabilità.

L'intervallo d'infiammabilità in l'aria è sempre meno esteso di quello della stessa sostanza miscelata con il solo ossigeno, in quanto l'azoto presente nell'aria (circa il 79%) non reagisce chimicamente nella combustione ed è dunque da considerare un diluente che diminuisce l'infiammabilità della miscela.

La presenza di gas inerti (N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, ecc.) abbassa notevolmente il limite superiore di infiammabilità della sostanza (UFL), senza far variare sensibilmente quello inferiore (LFL). In tal modo il campo di infiammabilità si restringe sempre più; continuando nell'aggiunta dell'inerte fino a che i due limiti praticamente coincidono si determina la "penisola d'infiammabilità", entro la quale tutti i punti corrispondono a miscele infiammabili; al di fuori, tutti i punti corrispondono a miscele non infiammabili (Figura 1).

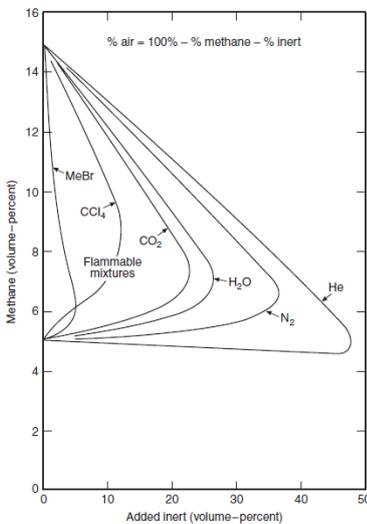


Figura 1 - Influenza dell'aggiunta di gas inerti, vapor d'acqua e inibitori sui limiti d'infiammabilità di miscele metano-aria [NFPA 69]

<sup>4</sup> Gas o vapore che, se miscelato con l'aria in determinate proporzioni, origina un'atmosfera esplosiva per la presenza di gas.

<sup>5</sup> Polvere, fibre o particelle in sospensione che possono bruciare o divenire incandescenti nell'aria e potrebbero dare origine a miscele esplosive con l'aria alla pressione atmosferica e alle temperature normali.

<sup>6</sup> Nel seguito, in luogo di gas/vapori infiammabili o polveri combustibili, se non diversamente specificato, si impiegherà per brevità: sostanza/e infiammabile/i.

<sup>7</sup> Limiti di concentrazione in aria di sostanza infiammabile entro i quali la miscela può formare un'atmosfera esplosiva: LFL (Lower Flammable Limit) e UFL (Upper Flammable Limit).

<sup>8</sup> Energia/temperatura sufficiente ad avviare la combustione.

<sup>9</sup> Scintille con energia di quest'ordine di grandezza non sono praticamente visibili ad occhio nudo; si consideri, ad esempio, che nell'accensione piezoelettrica di una normale cucina a gas la scintilla (visibile) possiede un'energia di circa 100 mJ.



Ai fini pratici, i diagrammi d'infiammabilità vengono tipicamente rappresentati su tre assi, come nell'esempio riportato in Figura 3:

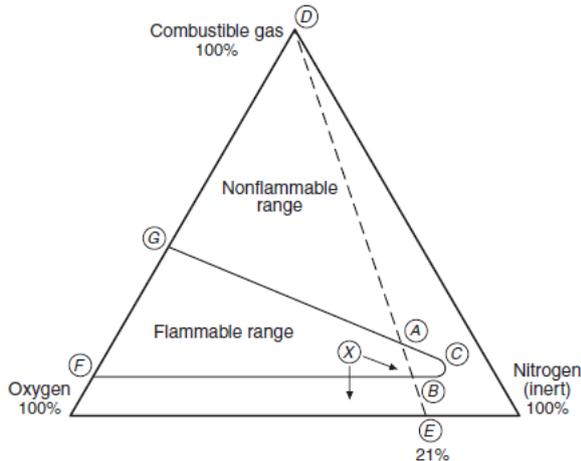


Figura 3 – Diagramma triangolare d'infiammabilità relativo ad una generica miscela combustibile-ossigeno-azoto [NFPA 69]

In questo tipo di diagramma la somma delle tre componenti dei gas risultano pari al 100% in qualsiasi punto dello stesso.

All'interno della zona delimitata dalle lettere FBCAG si è nel campo d'infiammabilità. Il punto C rappresenta il limite della concentrazione di ossigeno al di sotto del quale nessuna miscela può essere accesa (LOC<sup>12</sup>).

Il lato sinistro del triangolo rappresenta la sola miscela ossigeno-combustibile (cioè senza azoto) dove i punti F e G corrispondono, rispettivamente, al LFL e al UFL.

Il lato destro del triangolo rappresenta la sola miscela azoto-combustibile (cioè senza ossigeno).

La linea tratteggiata DABE rappresenta tutte le composizioni della miscela ininflammabile-aria che contengono un rapporto 79:21 di azoto-ossigeno (condizioni atmosferiche), dove i punti A e B corrispondono, rispettivamente, al UFL e al LFL.

La pressione e la temperatura hanno un effetto sul diagramma d'infiammabilità come riportato in Figura 4, dove un incremento della pressione si traduce in un aumento del UFL e una corrispondente diminuzione del LOC (punti C, C', C'').

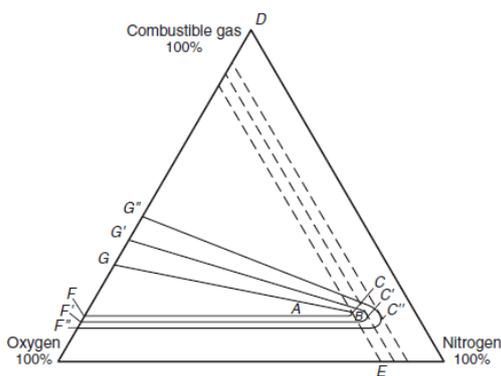


Figura 4 – Effetto della pressione sul diagramma triangolare d'infiammabilità relativo ad una generica miscela combustibile-ossigeno-azoto [NFPA 69]

<sup>12</sup> Limiting Oxygen Concentration - Massima concentrazione di ossigeno in una miscela di sostanza infiammabile e aria e un gas inerte, nella quale non si verifica un'esplosione, determinata in condizioni di prova specificate.

In presenza di polveri combustibili la riduzione della percentuale di ossigeno ha l'effetto di ridurre la severità dell'esplosione fino al suo annullamento (Figura 5).

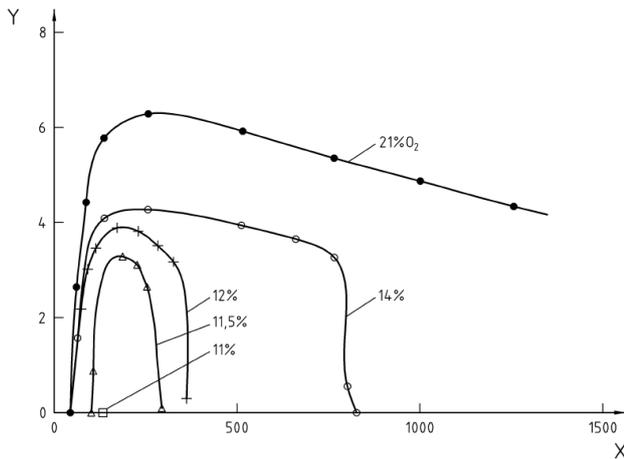


Figura 5 – Influenza della riduzione della percentuale di ossigeno sulle caratteristiche d'infiammabilità della polvere di carbone [CEN/TR 15281]

**Legenda**

- X = Concentrazione della polvere [g/m<sup>3</sup>]
- Y = Pressione massima di esplosione [bar]

## 2.1 METODI DI INERTIZZAZIONE

### 2.1.1 Inertizzazione in pressione (pressure swing inerting)

Il sistema chiuso deve essere in grado di resistere a sovrappressioni. Il metodo consiste in una serie di cicli di pressurizzazione con gas inerte e sfiato atmosferico, fino a raggiungere il valore di concentrazione di ossigeno previsto.

Dischi di rottura o valvole di sicurezza devono essere compatibili con la pressione da creare.

### 2.1.2 Inertizzazione sottovuoto (vacuum swing inerting)

Il sistema chiuso deve essere in grado di resistere a variazioni di pressioni negative rispetto alla pressione atmosferica. Il metodo consiste in una serie di cicli di vuoto e nel successivo ripristino della pressione atmosferica con gas inerte, fino a raggiungere il valore di concentrazione di ossigeno previsto.

Dischi di rottura o valvole di sicurezza devono essere compatibili con la pressione negativa da creare.

### 2.1.3 Inertizzazione con flussaggio (flow through inerting)

È adatto ai sistemi chiusi non in grado di resistere alla sovrappressione o al vuoto oppure per tubazioni e contenitori con forma allungata. Il metodo consiste nel flussaggio continuo con gas inerte all'interno del sistema da inertizzare con scarico in atmosfera ed è valido nell'ipotesi di una perfetta miscelazione del gas inerte con l'aria.

## 2.2 SISTEMA DI MONITORAGGIO E CONTROLLO

Un sistema di monitoraggio e controllo è indispensabile per **stabilire e mantenere** le condizioni di sicurezza conseguibili con l'inertizzazione. L'affidabilità di tale sistema è quindi elemento essenziale nella prevenzione della formazione di atmosfere esplosive.

L'affidabilità del sistema di monitoraggio e controllo deve essere assicurata con l'applicazione delle norme tecniche della serie CEI EN 61508 e CEI EN 61511 o di altre norme di equivalente o superiore livello di sicurezza [CEN/TR 15281, art. 8].

Il monitoraggio può avvenire secondo le due seguenti principali tipologie di misurazione:

- a) misurazione continua della concentrazione di ossigeno;
- b) metodi indiretti.

Con il primo metodo, la misurazione continua della concentrazione di ossigeno nel sistema inertizzato comporta:

- il campionamento del gas mediante sensori in uno o più punti rappresentativi;
- il monitoraggio dell'efficienza dei sensori a contatto con il fluido di processo (questi tendono infatti a sporcarsi con la conseguente riduzione sia dell'efficienza sia della vita utile);
- l'attuazione di un programma di manutenzione e calibrazione periodica dei sensori, da assicurare anche in condizioni di ciclo continuo del processo.

I vantaggi di questo metodo sono:

- misura diretta dei parametri di sicurezza del processo;
- minimizzazione del consumo di gas inerte;
- rapida individuazione di eventuali perdite e anomalie;

mentre gli svantaggi sono:

- livello di affidabilità dei sensori che potrebbe essere inadeguato e necessitare quindi di misure di sicurezza aggiuntive (tipicamente: controllo continuo sia della pressione sia del flusso di gas inerte);
- contaminazione dei sensori con il fluido di processo.

Il secondo metodo prevede la misura dei parametri:

- di pressione/vuoto e del numero di cicli di lavaggio per il metodo di inertizzazione in pressione e sottovuoto;
- del flusso di gas inerte e del tempo di lavaggio per il metodo di inertizzazione con flussaggio.

Nell'utilizzo di metodi indiretti è indispensabile procedere alla misura diretta della concentrazione di ossigeno nel sistema inertizzato, sia inizialmente, per confermare l'esattezza dei calcoli con i quali sono stati definiti i parametri di inertizzazione, sia periodicamente, per rivelare eventuali anomalie.

### 2.2.1 Margini di sicurezza

L'inertizzazione può essere considerata efficace se il contenuto di ossigeno è misurato e mantenuto al di sotto del LOC, tenendo conto delle fluttuazioni della concentrazione di ossigeno o di altre anomalie che possono presentarsi durante l'esercizio. A tal fine devono essere controllati i seguenti parametri (Figura 6):

- concentrazione limite di ossigeno (LOC);
- massima concentrazione di ossigeno consentita nella macchina/recipiente (MAOC - *Maximum Allowable Oxygen Concentration*);
- livello di concentrazione di ossigeno in corrispondenza del quale il sistema di controllo interrompe il processo e mette in sicurezza la macchina/recipiente (TP – *Trip Point*);
- livello di concentrazione di ossigeno mantenuto dal sistema di controllo (SP – *Set Point*).

Figura 6 – Margini di sicurezza di un sistema di inertizzazione



### 3. VALUTAZIONE DEL RISCHIO DI ESPLOSIONE

#### 3.1 GENERALITÀ SUI DISPOSITIVI DI SICUREZZA UTILIZZATI PER LA PROTEZIONE DI IMPIANTI INDUSTRIALI

I sistemi di sicurezza per la protezione di impianti industriali si installano dove, in caso di avarie o malfunzionamenti, esiste un pericolo per le persone, per l'ambiente o per l'integrità degli stessi impianti/processi. Questi sistemi non fanno parte del controllo di processo e sono da questo indipendenti, avendo lo scopo di rendere l'impianto sicuro in caso di malfunzionamento dello stesso.

L'affidabilità di tali sistemi di sicurezza basati su una tecnologia elettrica, elettronica ed elettronica programmabile è normata, in ambito internazionale, da varie norme tecniche relative alla sicurezza funzionale (*Safety-related systems*).

La norma CEI EN 61508 *Sicurezza funzionale dei sistemi elettrici, elettronici ed elettronici programmabili per applicazioni di sicurezza*, rappresenta un riferimento generale per la materia, è destinata ai fabbricanti di componenti e sistemi di sicurezza ed ha introdotto il concetto fondamentale di livello di integrità della sicurezza (SIL - *Safety Integrity Level*) delle funzioni che devono garantire la sicurezza dell'attrezzatura sotto controllo (EUC - *Equipment Under Control*) e della strumentazione che la realizzano, quale indice della sicurezza funzionale.

Tale norma definisce valori discreti di SIL da 1 a 4, in ordine crescente di integrità, a cui corrispondono gamme di valori di probabilità di fallimento decrescente della funzione di sicurezza considerata, per due condizioni di funzionamento (Tabella 3.1):

- funzionamento a bassa richiesta di intervento della funzione (meno di una volta all'anno), per il quale si specifica la probabilità per ogni singolo evento;
- funzionamento ad alta richiesta di intervento della funzione (o continua), per il quale si specifica la densità di probabilità (probabilità per ora di funzionamento).

Tabella 3.1 - Livelli di Integrità della Sicurezza definiti nella norma CEI EN 61508

Livello di Integrità della Sicurezza (SIL)	Probabilità di fallimento media su domanda per anno (o bassa domanda) (PFD <sub>avg</sub> )	Disponibilità di Sicurezza (1-PFD <sub>avg</sub> )	Fattore di Riduzione del Rischio (RRF)	Probabilità di fallimento media per ora (modo continuo o alta domanda) (PFH)
SIL 4	$\geq 10^{-5} \text{ a } < 10^{-4}$	99,99 ÷ 99,999%	100.000 ÷ 10.000	$\geq 10^{-9} \text{ a } < 10^{-8}$
SIL 3	$\geq 10^{-4} \text{ a } < 10^{-3}$	99,9 ÷ 99,99%	10.000 ÷ 1.000	$\geq 10^{-8} \text{ a } < 10^{-7}$
SIL 2	$\geq 10^{-3} \text{ a } < 10^{-2}$	99 ÷ 99,9%	1.000 ÷ 100	$\geq 10^{-7} \text{ a } < 10^{-6}$
SIL 1	$\geq 10^{-2} \text{ a } < 10^{-1}$	90 ÷ 99%	100 ÷ 10	$\geq 10^{-6} \text{ a } < 10^{-5}$

Nel quadro della norma CEI EN 61508 è stata predisposta una norma specifica per l'industria di processo: CEI EN 61511 *Sicurezza funzionale - Sistemi strumentali di sicurezza per il settore dell'industria di processo*. Quest'ultima rispecchia la struttura e i contenuti della norma di riferimento ma fornisce prescrizioni maggiormente dettagliate e puntuali per la strumentazione di misura e controllo dei processi industriali, riprende i concetti base di ciclo di vita in sicurezza e di SIL e introduce i criteri di progetto dei sistemi strumentati di sicurezza (SIS - *Safety Instrumented System*) e delle relative funzioni strumentate di sicurezza (SIF - *Safety Instrumented Function*), il tutto adattato per l'industria di processo.

### 3.2 CRITERIO DI VALUTAZIONE DEL RISCHIO

Il criterio di seguito esposto costituisce una valutazione del rischio di esplosione di tipo semplificato [F. Di Tosto, 2008]. Esso trae spunto dal Rapporto EU SAFEC conseguente al progetto di ricerca europeo Contract SMT4-CT98-2255 *Determination of Safety Categories of Electrical Devices used in Potentially Explosive Atmospheres*.

Il Rapporto SAFEC è stato a suo tempo preso come riferimento per l'elaborazione della norma CEI EN 50495 *Dispositivi di sicurezza richiesti per il funzionamento sicuro degli apparecchi in relazione al rischio di esplosione*, armonizzata con la direttiva ATEX 1994/9/CE (ora sostituita dalla direttiva 2014/34/UE) e, anche se privo di valenza normativa e predisposto per altri scopi, contiene una serie di informazioni e considerazioni di interesse che sono state qui utilizzate per stabilire il criterio di **valutazione del livello di rischio di "impianto"**, riconducibile al Titolo XI del DLgs 81/2008.

Tale criterio rientra nella cosiddetta metodologia LOPA (*Layers of Protection Analysis*): una o più cause iniziatrici possono condurre alla conseguenza C; ciascuna coppia causa-conseguenza, viene chiamata "scenario". Inizialmente viene stimata la frequenza dell'evento iniziatore, quindi ciascun mezzo di protezione (IPL – *Independent Protection Level*) viene identificato e valutato in relazione alle proprie caratteristiche di mitigazione.

Questa metodologia, che può essere considerata di tipo semi-quantitativo, tiene conto di alcuni fattori tipici dell'esplosione, quali ad esempio: la probabilità che l'atmosfera esplosiva si verifichi, la probabilità che le sorgenti di accensione siano presenti e che diventino efficaci, la probabilità di guasto (PFD - *Probability of Failure on Demand*) di eventuali mezzi di prevenzione e di protezione adottati.

La metodologia LOPA conduce alla stima della probabilità della conseguenza indesiderata attraverso la moltiplicazione della frequenza dell'evento iniziatore e delle PFD<sub>s</sub> associate agli IPL individuati secondo la formula seguente:

$$f_i^C = f_i^I \cdot PFD_{i1} \cdot PFD_{i2} \cdot PFD_{i3} \cdot \dots \cdot PFD_{ij}$$
$$f_i^C = f_i^I \prod_{j=1}^J PFD_{ij}$$

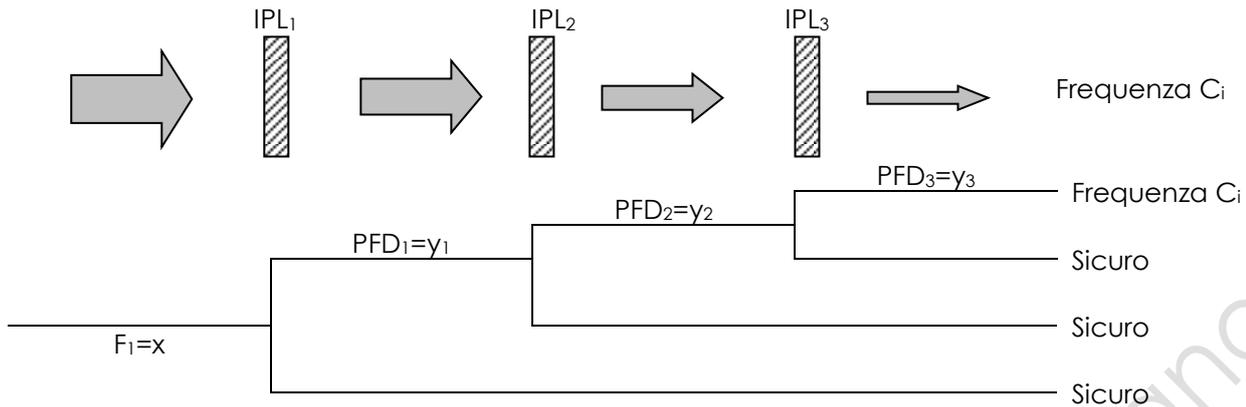
dove:

$f_i^C$  = frequenza per la conseguenza C dell'evento iniziatore  $i$ ;

$f_i^I$  = frequenza dell'evento iniziatore  $i$ ;

$PFD_{i,j}$  = probabilità di guasto su richiesta del  $J$ -mo IPL che protegge contro la conseguenza C per l'evento iniziatore  $i$ .

In forma grafica:



Spesso gli IPL includono delle funzioni strumentate di sicurezza, per cui comunemente si fa riferimento ai livelli di integrità della sicurezza - SIL - secondo le norme CEI EN 61508 e CEI EN 61511.

La valutazione del rischio di esplosione tiene conto sia della stima della probabilità di formazione di un'atmosfera esplosiva sia della stima della probabilità di presenza di una sorgente di accensione efficace. Il danno alle persone è considerato sempre alto (danni gravi o morte) come suggerito dalla linea guida europea all'applicazione della direttiva 1999/92/CE (COM/2003/515/ def.).

La probabilità di formazione di un'atmosfera esplosiva può essere classificata in termini di "zone" secondo le norme della serie CEI EN 60079-10 (zone 0, 1, 2, 20, 21, 22).

La probabilità di presenza di una sorgente di accensione efficace può essere classificata in termini di tolleranza al guasto FT (*Fault Tolerance*). FT viene definito come il numero di guasti indipendenti ritenuti ammissibili senza che la sorgente di accensione diventi efficace (in una situazione priva di sistemi di protezione o dispositivi).

Se la  $FT = n$ , la sorgente di accensione diventa efficace con  $n + 1$  guasti.

Si possono così stabilire i seguenti requisiti relativi alle categorie dei prodotti:

- FT 2: sono ammissibili due guasti indipendenti senza che la sorgente di accensione diventi efficace (corrisponde ai prodotti di categoria 1 secondo la direttiva 2014/34/UE);
- FT 1: è ammissibile un guasto senza che la sorgente di accensione diventi efficace (corrisponde ai prodotti di categoria 2 secondo la direttiva 2014/34/UE);
- FT 0: non sono ammissibili guasti durante il normale funzionamento (corrisponde ai prodotti di categoria 3 secondo la direttiva 2014/34/UE);
- FT -1: la sorgente di accensione non è causata da un guasto (può essere presente durante il normale esercizio) oppure la sorgente di accensione e la formazione di un'atmosfera esplosiva hanno una causa comune.

Viene così realizzata una correlazione tra la categoria di un prodotto certificato secondo la direttiva 2014/34/UE, o la categoria "assegnata" ad un prodotto preesistente alle direttive ATEX a seguito dell'analisi delle sue sorgenti di accensione, e la sua tolleranza al guasto (intesa con riferimento all'insorgenza di una sorgente di accensione efficace).

Gli eventuali dispositivi di sicurezza (SD – Safety Device) utilizzati quali mezzi (IPL) per ridurre la probabilità di formazione di una sorgente di accensione efficace dell'apparecchiatura sotto controllo ed aumentarne quindi la tolleranza al guasto, sono valutati in base al loro livello SIL secondo il seguente criterio (Tabella 3.2):

**Tabella 3.2 - Corrispondenza tra le categorie della direttiva 2014/34/UE e il livello di integrità della sicurezza degli eventuali dispositivi di sicurezza adottati per aumentare la tolleranza al guasto dell'apparecchiatura sotto controllo**

Area pericolosa	Zona 0 Zona 20			Zona 1 Zona 21			Zona 2 Zona 22	
	Tolleranza al guasto FT dell'apparecchiatura sotto controllo EUC	2	1	0	1	0	-1	0
Livello di integrità della sicurezza SIL del dispositivo di sicurezza SD	-	SIL 1	SIL 2	-	SIL 1	SIL 2	-	SIL 1
Categoria dell'apparecchio combinato EUC+SD	1			2			3	

Infine, nella tabella seguente vengono associati agli elementi della colonna 1 i valori numerici relativi:

- al tipo di zona pericolosa (valutazione della zona pericolosa);
- alla tolleranza al guasto FT (valutazione dell'apparecchiatura/impianto);
- al SIL associato all'eventuale IPL adottato (valutazione dell'IPL stesso).

Sempre con riferimento alle informazioni e considerazioni di interesse contenute nel Rapporto SAFEC citato, il rischio di esplosione si intende accettabile se la sommatoria della colonna 3,  $\sum_i$  risulta  $\geq 2$ .

**Tabella 3.3 - Valutazione del rischio di esplosione**

1	2	3
Elementi valutati	Probabilità/Frequenza	Valore
Formazione di atmosfera esplosiva	Zona	0 (0, 20), 1 (1, 21), 2 (2, 22)
IPL 1: prevenzione formazione atmosfera esplosiva	SIL	1, 2, 3
Presenza di una sorgente di accensione efficace (EUC)	FT	-1, 0, 1, 2
IPL 2: prevenzione accensione atmosfera esplosiva	SIL	1, 2, 3
IPL 3: mitigazione effetti dell'esplosione	SIL	1, 2, 3
		$\sum(I) \geq 2$

## 4. ESEMPIO

### 4.1 DATI DI INGRESSO

A seguito della valutazione dei rischi svolta da un datore di lavoro ai sensi del DLgs 81/2008, riguardante una macchina che processa liquidi infiammabili<sup>13</sup> e polveri combustibili a pressione atmosferica, è risultato necessario procedere con una specifica analisi dei rischi di esplosione per individuare le misure tecniche e organizzative più idonee a garantire la sicurezza dei lavoratori.

I dati di ingresso forniti dal datore di lavoro al suo ufficio tecnico, sono i seguenti:

- il processo costituisce un'ordinaria attività, svolta per alcune ore durante ogni giornata lavorativa nel corso dell'anno;
- la macchina non è marcata ai sensi delle direttive ATEX di prodotto;
- tra i liquidi infiammabili utilizzati quello ritenuto rappresentativo è l'esano-*n*, le cui caratteristiche significative sono le seguenti:

Numero CAS	Temperatura d'infiammabilità <sup>14</sup> $T_i$ - Temperatura di accensione <sup>15</sup> $T_{acc}$ (°C)	Densità relativa all'aria del gas o vapore	LFL - UFL  % v/v	Gruppo e Classe di temperatura	Minima energia di accensione <sup>16</sup> MIE  (mJ)	Conducibilità <sup>17</sup>  (pS/m)	Tempo di decadimento della carica <sup>18</sup>  (s)	LOC N <sub>2</sub> /aria  % O <sub>2</sub> v/v
110-54-3	- 21	2,97	1,20	IIA <sup>19</sup> T3 <sup>20</sup>	0,24	10 <sup>-5</sup>	≈ 100	12
	233		7,50					

<sup>13</sup> Liquido in grado di produrre vapore infiammabile in una qualsiasi condizione operativa prevedibile.

<sup>14</sup> Temperatura minima alla quale, in condizioni di prova specificate, un liquido rilascia una quantità sufficiente di gas o vapore combustibile in grado di accendersi all'applicazione di una sorgente di accensione efficace.

<sup>15</sup> Minima temperatura di una superficie riscaldata alla quale, in condizioni specificate, avviene l'accensione di una sostanza infiammabile allo stato di gas o vapore in miscela con aria.

<sup>16</sup> Energia minima sufficiente ad innescare l'accensione dell'atmosfera esplosiva più facilmente infiammabile in condizioni di prova specificate.

<sup>17</sup> Proprietà intrinseca di un solido o liquido che governa il modo in cui le cariche elettriche si muovono attraverso la sua superficie o attraverso la sua massa.

<sup>18</sup> Tempo in cui una carica elettrostatica su una superficie solida, nella massa di un liquido o di una polvere, oppure in una nube di nebbia o di polvere, scende esponenzialmente ad un valore pari a 1/e (cioè circa al 37%) rispetto al suo valore originale.

<sup>19</sup> Sostanza rappresentativa per le prove del Gruppo IIA: propano.

<sup>20</sup> Massima temperatura superficiale delle apparecchiature per la Classe T3: 200 °C.

- il processo prevede, in diverse fasi, l'aggiunta manuale di resine in polvere contenute in sacchi da 25 kg attraverso un passo d'uomo; le caratteristiche significative della polvere sono le seguenti:

Grandezza media delle particelle	LEL	Massima sovrappressione di esplosione <sup>21</sup> $P_{max}$	Indice di esplosione <sup>22</sup> $K_{st}$	Classe di infiammabilità <sup>23</sup> $St$ - Classe di combustibilità <sup>24</sup> $BZ$	Minima energia di accensione MIE	Temperatura di accensione della nube <sup>25</sup> $T_{ci}$	Conducibilità <sup>26</sup>	LOC $N_2/aria$
( $\mu m$ )	$g/m^3$	(bar)	(bar·m/s)		(mJ)	(°C)	(C/NC)	% $O_2$ v/v
< 63	15	9	120	1 - 2	< 10	390	NC	11

#### 4.2 PRIME CONSIDERAZIONI

Da un approfondimento dei dati d'ingresso si può dedurre:

- l'uso della macchina è frequente; la presenza di vapori infiammabili e/o polveri combustibili al suo interno è valutata in oltre 1.000 ore/anno; mettendo in relazione il tipo di zona pericolosa con la probabilità e durata dell'atmosfera esplosiva secondo il seguente schema [RoSPA/ICI, 1973; McMillan, 1998; Institute of Petroleum, 1990; CEI 31-35]:

Tipo di zona	Probabilità di atmosfera esplosiva in 365 giorni (10.000 h)	Durata complessiva di atmosfera esplosiva in 365 giorni (10.000 h)
0 <sup>27</sup> / 20 <sup>28</sup>	$P > 10^{-1}$	Oltre 1000 h
1 <sup>29</sup> / 21 <sup>30</sup>	$10^{-1} \geq P > 10^{-3}$	10 h ÷ 1000 h
2 <sup>31</sup> / 22 <sup>32</sup>	$10^{-3} \geq P > 10^{-5}$	0,1 h ÷ 10 h

il lato interno della macchina viene classificato come zona 0 e zona 20;

<sup>21</sup> Massima sovrappressione che si verifica in un recipiente chiuso durante l'esplosione di un'atmosfera esplosiva in condizioni di prova specificate.

<sup>22</sup> Costante caratteristica della polvere determinata attraverso la *legge cubica*, che esprime la dipendenza della velocità massima di aumento della pressione di esplosione  $(dp/dt)_{max}$  dal volume dell'ambiente in cui avviene l'esplosione.

<sup>23</sup> Categorie in cui sono classificate le polveri in base al valore di  $K_{st}$ .

<sup>24</sup> Comportamento qualitativo (innesco e propagazione) della combustione in strato delle polveri.

<sup>25</sup> La più bassa temperatura di una parete calda interna ad un forno alla quale si verifica l'accensione in una nube di polvere nell'aria contenuta al suo interno.

<sup>26</sup> C: polvere combustibile con resistività elettrica  $\leq 10^3 \Omega \cdot m$ , NC: polvere combustibile con resistività elettrica  $> 10^3 \Omega \cdot m$ .

<sup>27</sup> Area in cui è presente in permanenza o per lunghi periodi o frequentemente un'atmosfera esplosiva consistente in una miscela di aria e di sostanze infiammabili sotto forma di gas, vapore o nebbia.

<sup>28</sup> Area in cui è presente in permanenza o per lunghi periodi o frequentemente un'atmosfera esplosiva sotto forma di nube di polvere combustibile nell'aria.

<sup>29</sup> Area in cui la formazione di un'atmosfera esplosiva, consistente in una miscela di aria e di sostanze infiammabili sotto forma di gas, vapori o nebbia, è probabile che avvenga occasionalmente durante le normali attività.

<sup>30</sup> Area in cui la formazione di un'atmosfera esplosiva sotto forma di nube di polvere combustibile nell'aria, è probabile che avvenga occasionalmente durante le normali attività.

<sup>31</sup> Area in cui durante le normali attività non è probabile la formazione di un'atmosfera esplosiva consistente in una miscela di aria e di sostanze infiammabili sotto forma di gas, vapore o nebbia o, qualora si verifichi, sia unicamente di breve durata.

<sup>32</sup> Area in cui durante le normali attività non è probabile la formazione di un'atmosfera esplosiva sotto forma di nube di polvere combustibile o, qualora si verifichi, sia unicamente di breve durata.

- nella fase di caduta dell'agglomerato di polveri nella macchina, le particelle in aria possono trattenere una carica elettrostatica<sup>33</sup>;
- la sensibilità all'accensione delle polveri può essere classificata sulla base della minima energia di accensione [Perry' handbook of chemical engineering]:

Minima energia di accensione <i>MIE</i>	Entità della sensibilità all'accensione
$MIE \geq 10 \text{ mJ}$	Normale sensibilità all'accensione
$3 \text{ mJ} \leq MIE < 10 \text{ mJ}$	Particolare sensibilità all'accensione
$MIE < 3 \text{ mJ}$	Estrema sensibilità all'accensione

pertanto, in prima istanza e senza ulteriori approfondimenti, si assume che le polveri in questione siano "particolarmente/estremamente sensibili all'accensione" e che possano quindi essere accese anche da scariche elettrostatiche del tipo a spazzola (brush discharges), le quali possono rilasciare energie sino a circa 3 mJ e formarsi tra un punto messo a terra e le polveri combustibili o tra le stesse polveri combustibili (le scariche a spazzola sono sicuramente efficaci nell'accensione di gas e vapori infiammabili mentre non è provato che esse possano contribuire all'accensione di atmosfere esplosive dovute a polveri combustibili. Si adotta tuttavia un atteggiamento di prudenza assumendo che le scariche a spazzola siano in grado di innescare atmosfere esplosive dovute a polveri combustibili fino al limite della loro energia di rilascio - polveri con  $MIE \leq 3 \text{ mJ}$ );

- vapori infiammabili e polveri combustibili possono essere contemporaneamente presenti in aria, con formazione di miscele ibride<sup>34</sup>;
- non può essere esclusa la presenza di sorgenti di accensione di varia natura all'interno della macchina o all'interfaccia con l'ambiente esterno, in particolare le scariche elettrostatiche devono essere considerate intrinseche al normale esercizio (presenti quindi anche in assenza di guasti); inoltre:
  - la macchina non è marcata CE ai sensi delle direttive ATEX di prodotto in quanto preesistente alle stesse e, pertanto, le sue potenziali sorgenti di accensione dovrebbero essere oggetto di specifica analisi dei rischi per verificare se il livello di sicurezza offerto può essere ritenuto "molto elevato" (categoria 1<sup>35</sup>) secondo i criteri della direttiva 2014/34/UE e quindi coerente con la zona pericolosa classificata come 0 e 20, pur senza disporre di tutte le informazioni necessarie (il fascicolo tecnico della macchina è in possesso del fabbricante);
  - il caricamento di polveri in reattori contenenti un liquido infiammabile è una delle cause più frequenti di incidenti attribuiti alle cariche elettrostatiche, poiché durante le operazioni di carico delle polveri le scariche elettrostatiche si formeranno sempre vicino al passo d'uomo, dove è più facile la presenza di miscele infiammabili.

<sup>33</sup> Dal momento che l'aria è non conduttiva, la diminuzione di carica per una polvere in sospensione nell'aria (nube di polvere) non è influenzata dalla resistività di volume della polvere stessa. La carica resta sulle particelle di polvere finché esse non interagiscono tra loro o con l'equipaggiamento. In tali circostanze, il decadimento della carica è principalmente influenzato dal movimento delle particelle provocato dalla corrente d'aria, dalla gravità e dai campi di cariche nello spazio.

<sup>34</sup> Miscela con l'aria di sostanze infiammabili in stati fisici diversi. Se un gas o un vapore infiammabile viene addizionato ad una polvere combustibile, l'esplosibilità di quest'ultima risulta aumentata, facendone diminuire una serie di caratteristiche quali: il limite inferiore di esplosibilità (LEL), l'energia minima di accensione (MIE), la temperatura minima di accensione in nube ( $T_{ci}$ ) e in strato ( $T_{5mm}$ ).

<sup>35</sup> Apparecchi progettati per funzionare conformemente ai parametri operativi stabiliti dal fabbricante e garantire un livello di protezione molto elevato.

**4.3 VALUTAZIONE DEL RISCHIO DI ESPLOSIONE ALLO STATO DI FATTO**

Applicando la Tabella 3.3 al caso in esame (lato interno della macchina) si ottiene:

1	2	3
Elementi valutati	Probabilità/Frequenza	Valore
Formazione di atmosfera esplosiva	Zona	0 (0, 20)
IPL 1: prevenzione formazione atmosfera esplosiva	SIL	NA
Presenza di una sorgente di accensione efficace (EUC)	FT	-1
IPL 2: prevenzione accensione atmosfera esplosiva	SIL	NA
IPL 3: mitigazione effetti dell'esplosione	SIL	NA
		$\sum(I) = -1$
NA: non applicabile		

L'esito della valutazione è sfavorevole, è quindi necessario implementare le misure di sicurezza.

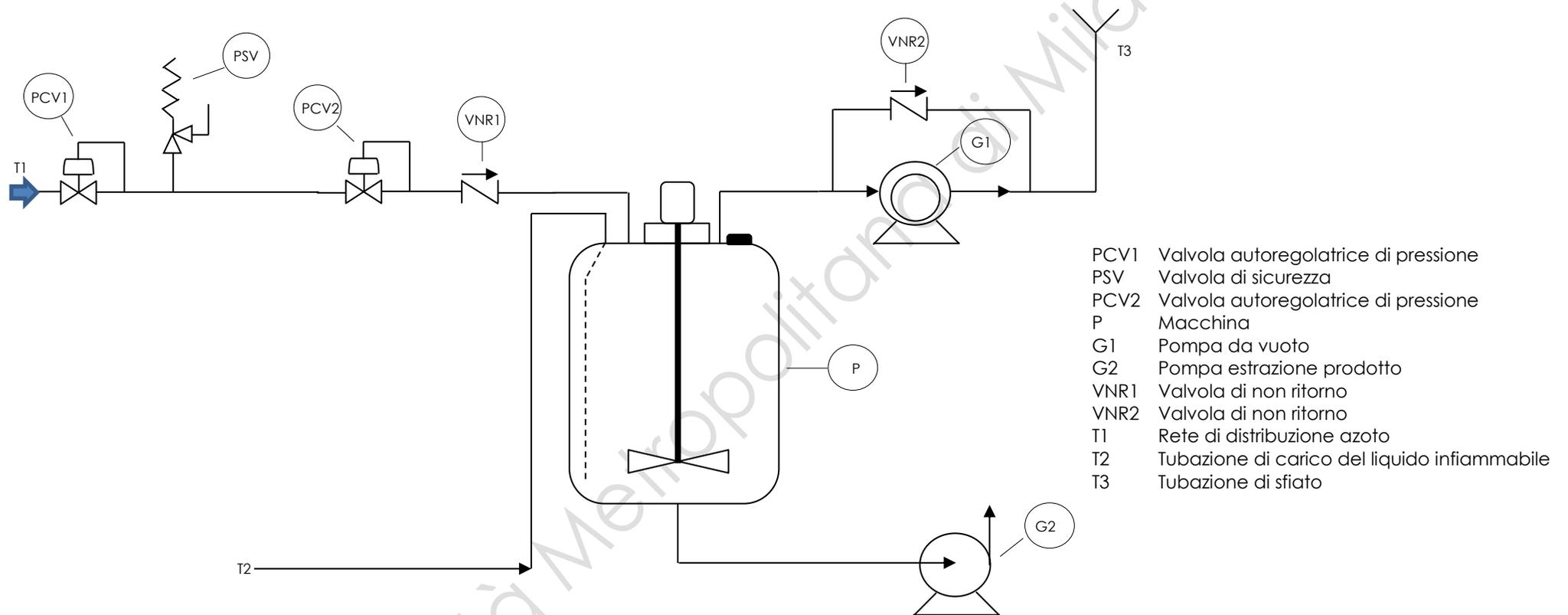
Si decide di prevenire la formazione di atmosfera esplosiva (IPL 1) mediante inertizzazione con azoto mediante il metodo *sottovuoto*, essendo la macchina adatta a tale applicazione.

ATS Città Metropolitana di Milano

#### 4.4 INERTIZZAZIONE DELLA MACCHINA

Si ipotizza il seguente schema<sup>36</sup> (Figura 4.1) di alimentazione del gas inerte (azoto):

Figura 4.1



<sup>36</sup> Semplificato e riportante solo i componenti utili per l'analisi del rischio di esplosione.

#### 4.4.1 Cicli di vuoto

Si considerano i seguenti parametri:

- LOC dei vapori di esano-*n* = 12 %;
- LOC delle *polveri combustibili* = 11 %.

Si stabiliscono quindi i seguenti parametri di sicurezza da raggiungere e mantenere:

- LOC = 8 % (si adotta un margine di sicurezza sul valore del LOC più basso);
- MAOC = 5 %.

Il numero di cicli di vuoto necessario, viene determinato come segue (CEN/TR 15281, Appendice B) in funzione della concentrazione di ossigeno da raggiungere. L'equazione utilizzata assume che l'espansione e la compressione durante i cicli di lavaggio siano isotermitici.

$$C_n = C_i + (C_0 - C_i) \cdot \left(\frac{P_1}{P_2}\right)^n = 0,5\% + (21\% - 0,5\%) \cdot \left(\frac{0,2\text{bar}}{1\text{bar}}\right)^1 = 4,6\% \quad (1)$$

dove:

$C_n$		concentrazione di ossigeno dopo $n$ cicli di vuoto (% v/v)
$C_i$	= 0,5 %	concentrazione di ossigeno nel gas inerte (ipotesi cautelativa)
$C_0$	= 21 %	concentrazione iniziale di ossigeno nella macchina
$P_1$	= 0,2 bar	pressione assoluta minima nella macchina durante il ciclo di vuoto
$P_2$	= 1 bar	pressione assoluta massima nella macchina durante il ciclo di vuoto (pressione atmosferica)
$n$	= 1	<b>numero di cicli di vuoto</b>

#### 4.4.2 Aggiunta delle polveri

L'aggiunta di solidi all'interno di un contenitore inertizzato comporta l'apertura verso l'atmosfera e inevitabilmente l'ingresso di aria. Per evitare ciò, può essere utilizzato un dispositivo con doppia valvola: con valvola inferiore chiusa, la valvola superiore viene aperta e vengono versati nello spazio inter-valvole i solidi; successivamente viene richiusa la valvola superiore e aperta quella inferiore facendo cadere i solidi nel recipiente. In questo modo viene limitata l'aria introdotta nell'atmosfera inertizzata del recipiente.

Dove i quantitativi di polvere sono troppo elevati o per altri motivi, il dispositivo a doppia valvola può essere a sua volta inertizzato e automatizzato per funzionare in ciclo chiuso con il contenitore.

Nel caso specifico, l'attuale metodo di lavoro e l'impianto di processo non consentono di adottare il dispositivo sopra descritto.

L'aggiunta di solidi all'interno della macchina inertizzata avverrà quindi utilizzando uno scivolo aperto; ciò comporta l'apertura verso l'atmosfera ed inevitabilmente l'ingresso di aria. Il livello di ossigeno dopo  $n$  carichi di solidi viene determinato come segue (CEN/TR 15281, Appendice E):

$$V_n = V^* \cdot \left( \frac{1 - \exp\left(\frac{-Q \cdot n \cdot t^*}{U}\right)}{1 - \exp\left(\frac{-Q \cdot t^*}{U}\right)} \right) + V_0 = \quad (2)$$

$$= 0,00525m^3 \cdot \left( \frac{1 - \exp\left(\frac{-45m^3/h \cdot 10 \cdot 0,1h}{1m^3}\right)}{1 - \exp\left(\frac{-45m^3/h \cdot 0,1h}{1m^3}\right)} \right) + 0,046m^3 = 0,0513 m^3$$

dove:

$V_n$  volume di ossigeno dopo  $n$  carichi di solidi  
 $V^* = 0,00525 m^3$  volume di ossigeno per ogni carica di solidi (sacchi da 25 kg)  
 il valore è stato determinato considerando la densità delle polveri = 500 kg/m<sup>3</sup>, assumendo la frazione di aria nella massa di polvere = 0,5 e la frazione di ossigeno nell'aria = 0,21, da cui si ricava:

$$V^* = \frac{25kg}{500kg/m^3} \cdot 0,5 \cdot 0,21 = 0,00525 m^3$$

$Q = 45 m^3/h$  portata del flusso di gas inerte  
 $n = 10$  numero di carichi di solidi  
 $t^* = 0,1 h$  tempo tra una carica e l'altra all'ora ( $t^* = 1 h/10 = 0,1 h$ )  
 $U = 1 m^3$  volume libero nella macchina  
 $V_0 = 0,046 m^3$  volume iniziale di ossigeno nella macchina ( $V_0 = 1 m^3 \cdot 4,6\%$ )

Al termine degli  $n$  carichi la concentrazione di ossigeno nella macchina è pari a:

$$C = \frac{V_n}{U} \cdot 100 = \frac{0,0513m^3}{1m^3} \cdot 100 = 5,13 \%$$

Risultando superato il MAOC stabilito (5 %), un solo ciclo di inertizzazione non è quindi sufficiente si deve individuare il numero di cicli adeguato; ripetendo i calcoli con **due cicli** di vuoto:

$$C_n = C_i + (C_0 - C_i) \cdot \left(\frac{P_1}{P_2}\right)^n = 0,5\% + (21\% - 0,5\%) \cdot \left(\frac{0,2bar}{1bar}\right)^2 = 1,32 \% \quad (3)$$

da cui:

$$V_n = 0,00525m^3 \cdot \left( \frac{1 - \exp\left(\frac{-45m^3/h \cdot 10 \cdot 0,1h}{1m^3}\right)}{1 - \exp\left(\frac{-45m^3/h \cdot 0,1h}{1m^3}\right)} \right) + 0,0132m^3 = 0,0185m^3 \quad (4)$$

Al termine dei due cicli di vuoto la nuova concentrazione di ossigeno nella macchina è pari a:

$$C = \frac{V_n}{U} \cdot 100 = \frac{0,0185m^3}{1m^3} \cdot 100 = 1,85 \%$$

Tale concentrazione può essere ritenuta adeguata.

Una volta raggiunta la concentrazione di ossigeno prevista, la macchina verrà mantenuta ad una sovrappressione > 10 mbar rispetto alla pressione atmosferica.

Il carico delle polveri dal passo d'uomo con l'utilizzo di uno scivolo aperto è intrinsecamente pericoloso sia per la possibilità di perdere l'atmosfera inerte, sia per i rischi di soffocamento del personale (anossia).

Per mitigare il primo rischio si rende necessario garantire una leggera sovrappressione del gas inerte, al fine di ostacolare l'ingresso di ossigeno durante l'apertura del passo d'uomo; in linea di massima, si dovrà garantire una velocità di deflusso verso l'esterno dell'azoto di  $\approx 0,1 \text{ m/s} \div 0,2 \text{ m/s}$ <sup>37</sup>.

Per quanto attiene al secondo rischio, verrà installato un sistema di aspirazione localizzata opportunamente dimensionato in prossimità del passo d'uomo.

ATS Città Metropolitana di Milano

---

<sup>37</sup> Ad esempio, si consideri un passo d'uomo con diametro 0,4 m ( $S = 0,125 \text{ m}^2$ ); per ottenere una velocità del flusso di azoto verso l'esterno di 0,1 m/s, la portata del gas deve essere  $\approx 45 \text{ m}^3/\text{h}$  ( $0,125 \text{ m}^2 \cdot 0,1 \text{ m/s} \cdot 3600 \text{ s/h} = 45,216 \text{ m}^3/\text{h}$ ).

#### 4.5 REALIZZAZIONE DEL SISTEMA DI MONITORAGGIO E CONTROLLO

Due caratteristiche fondamentali che deve possedere il sistema di monitoraggio e controllo, sono [CEN/TR 15281]:

- a) un adeguato livello di affidabilità sia nella fase in cui vengono create le condizioni di atmosfera inerte prima dell'avvio della macchina (lavaggio iniziale), sia durante l'esercizio della stessa per il mantenimento delle condizioni di sicurezza, in conformità alle norme tecniche della serie CEI EN 61508 e CEI EN 61511 o di altre norme di equivalente o superiore livello di sicurezza;
- b) la messa in sicurezza della macchina in caso di superamento del valore massimo di concentrazione di ossigeno stabilito (Trip Point).

**In funzione del livello di integrità della sicurezza (SIL) del sistema di monitoraggio e controllo, il tipo di zona pericolosa nella macchina può essere ridotto fino alla sua eliminazione (atmosfera inerte), oppure rimanere invariato.** Si rende pertanto necessario stabilire una correlazione tra questi due parametri (Zona-SIL).

A tal fine, facendo riferimento alla precedente Tabella 3.3 (Valutazione del rischio di esplosione), si stabilisce tale correlazione come segue (Tabella 4.1)<sup>38</sup>:

Tabella 4.1 – Correlazione tra il tipo di zona ed livello di integrità della sicurezza del sistema di monitoraggio e controllo dell'inertizzazione

Tipo di zona	Livello di integrità della sicurezza del sistema di monitoraggio e controllo dell'inertizzazione			
	SIL 3	SIL 2	SIL 1	No SIL
0/20	Zona non pericolosa	2/22	1/21	0/20
1/21	Zona non pericolosa	Zona non pericolosa	2/22	1/21
2/22	Zona non pericolosa	Zona non pericolosa	Zona non pericolosa	2/22

Alla luce della Tabella 4.1, prevedendo difficoltà oggettive nella realizzazione di un sistema di monitoraggio e controllo qualificabile SIL 3, si decide di:

- A. eliminare le sorgenti di accensione che possono essere presenti nel normale esercizio, ovvero eliminare la possibilità di formazione di scariche elettrostatiche, aumentando così la tolleranza ai guasti da FT = -1 a FT = 0;
- B. valutare la fattibilità realizzativa di un sistema di monitoraggio e controllo dell'inertizzazione qualificabile SIL 2; ciò comporta accettare la presenza di una zona 2/22 residua all'interno della macchina;
- C. analizzare le sorgenti di accensione interne alla macchina e valutarne l'idoneità in relazione alla zona 2/22 residua.

<sup>38</sup> Con riferimento alla Tabella 3.3, si consideri ad esempio:

- un valore 0 (zona 0/20) attribuito alla *formazione di atmosfera esplosiva*,
- un valore 2 (SIL 2) attribuito alla *prevenzione formazione atmosfera esplosiva (IPL 1)*.

Perché la sommatoria sia uguale a 2, cui corrisponde un rischio di esplosione accettabile secondo il criterio adottato, il valore della *presenza di una sorgente di accensione efficace* deve essere uguale a 0; tale valore corrisponde ai prodotti di categoria 3 secondo la direttiva 2014/34/UE, idonei per essere installati in zona 2/22.

#### 4.5.1 Eliminazione delle scariche elettrostatiche che possono essere presenti nel normale esercizio [CEI CLC/TR 60079-32-1]

La conducibilità dei liquidi  $\gamma$  può essere considerata:

- alta, se  $\gamma > 10.000$  pS/m;
- media, se  $50$  pS/m  $\leq \gamma \leq 10.000$  pS/m;
- bassa, se  $\gamma < 50$  pS/m.

Il liquido infiammabile rappresentativo (esano-*n*) è pertanto considerato a bassa conducibilità ( $10^{-5}$  pS/m) e quindi in grado di accumulare cariche elettrostatiche; una volta messo in contatto con la terra, il tempo necessario a diminuirne la carica elettrostatica a circa il 37% del valore iniziale è pari a  $\approx 100$  s.

Le polveri introdotte nella macchina sono combustibili e non conduttrici (resistività elettrica  $S > 10^3 \Omega \cdot m$ ).

La resistività dei solidi  $S$  può essere considerata:

- bassa<sup>39</sup>, se  $S \leq 10^6 \Omega \cdot m$  ( $\leq 1$  M $\Omega \cdot m$ );
- media, se  $10^6 \Omega \cdot m < S \leq 10^{10} \Omega \cdot m$  ( $1$  M $\Omega \cdot m < S \leq 10$  G $\Omega \cdot m$ );
- alta, se  $S > 10^{10} \Omega \cdot m$  ( $>10$  G $\Omega \cdot m$ ).

In assenza di dati più precisi, per la polvere in questione si assume una resistività di volume "alta" e quindi in grado di accumulare cariche elettrostatiche; per una stima di massima, si ipotizza che una volta messo l'agglomerato di polvere in contatto con la terra, il tempo necessario a diminuirne la carica elettrostatica di circa il 37% del valore iniziale sia pari a  $\approx 3.540$  s, calcolato con l'equazione  $\tau = S \cdot \epsilon \cdot \epsilon_0$ , dove:

- $S = 10^{14} \Omega \cdot m$ , resistività di volume della polvere (valore ipotizzato);
- $\epsilon = 4$ , costante dielettrica della polvere (valore ipotizzato, tratto da prodotti simili);
- $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  F/m, costante dielettrica del vuoto.

Visto quanto sopra si decide di:

*In generale*

- garantire un valore di resistenza elettrica complessiva verso terra del personale  $\leq 10^8 \Omega$ , mediante l'utilizzo di calzature, abiti, guanti e pavimenti con caratteristiche dissipative<sup>40</sup>; a tal fine l'idoneità verrà accertata:
  - per le calzature e i guanti, sulla base dei dati/certificazioni/dichiarazioni dei relativi fabbricanti;
  - per gli abiti, controllando che questi siano in cotone/dissipativi<sup>41</sup>, attillati (per quanto possibile) e che le operazioni di vestizione/svestizione avvengano fuori dalle zone pericolose;
  - per i pavimenti, mediante l'effettuazione di misure elettriche in conformità alla norma CEI EN 61340;

<sup>39</sup> In pratica, le polveri a bassa resistività di volume sono rare. Anche le polveri metalliche non restano conduttive a lungo, poiché si formano sulla superficie dei film di ossido che ne aumentano la resistività.

<sup>40</sup> Materiale che non è in grado di trattenere una quantità significativa della carica elettrostatica quando è in contatto con la terra; questi materiali hanno una resistività di volume  $S$  superiore a  $10^4 \Omega \cdot m$ , ma uguale o inferiore a  $10^9 \Omega \cdot m$ .

<sup>41</sup> Gli indumenti dissipativi utilizzati in atmosfera esplosiva sono dei Dispositivi di Protezione Individuale di II Categoria e devono pertanto essere conformi alla relativa direttiva europea. Nel caso specifico, considerando: la presenza di una zona 1 nell'ambiente prossimo alla macchina, una MIE della sostanza pericolosa rappresentativa = 0,24 mJ e una bassa probabilità di carica elettrostatica sull'operatore, gli abiti dissipativi possono essere previsti nell'ambito di interventi di miglioramento delle condizioni di sicurezza.

- garantire il collegamento a terra delle attrezzature prive di specifica protezione contro le esplosioni, quali transpallet, carrelli, ecc., tramite l'utilizzo di ruote in materiale dissipativo, dichiarato tale dal fabbricante;
- accertare la presenza e l'attuazione di procedure di lavoro;
- accertare la presenza e l'attuazione di procedure di manutenzione preventiva dei DPI, delle attrezzature e degli impianti;

#### *Liquidi*

- accertare che i materiali con i quali si trovano in contatto i liquidi nel sistema di contenimento e di trasporto (macchina, tubazioni, pompe, ecc.) siano conduttivi<sup>42</sup> o dissipativi e collegati a terra;
- individuare, valutare e possibilmente eliminare i componenti/rivestimenti isolanti (né conduttivi, né dissipativi);
- limitare la velocità di flusso del liquido durante il riempimento a valori  $< 1$  m/s nella fase iniziale e  $< 3,5$  m/s<sup>43</sup> nelle fasi successive;
- riempire la macchina tramite tubo in materiale conduttivo o dissipativo e collegato a terra, esteso fino quasi al fondo e diretto verso la parete per limitare gli spruzzi, evitando immissioni per caduta;
- realizzare un tempo di attesa  $\geq 120$  s prima di avviare la macchina (tempo di decadimento della carica), dopo il riempimento;

#### *Polveri*

- accertare che i materiali con i quali sono realizzati i contenitori delle polveri siano dichiarati dissipativi dai relativi fabbricanti e siano collegati a terra (ovvero che tali contenitori in materiale dissipativo siano a contatto con superfici non isolanti e quindi in grado di drenare a terra le cariche elettrostatiche);
- mantenere i contenitori delle polveri in contatto con la terra per un tempo  $\geq 60'$  prima di effettuare le operazioni di carico nella macchina (tempo di decadimento della carica);
- effettuare il carico delle polveri nella macchina lentamente e solo ad inertizzazione effettuata;
- collegare a terra tutti i componenti conduttivi e dissipativi utilizzati nel processo (contenitori, tubi, imbuti, scivoli, ecc.).

---

<sup>42</sup> Materiale che non è in grado di trattenere una significativa carica elettrostatica, quando è in contatto con la terra, ed avente una resistività di volume  $S$  uguale o inferiore a  $10^4 \Omega \cdot m$ .

<sup>43</sup> Nel caso di liquidi a bassa conducibilità o con conducibilità non nota, caricati in serbatoi di media dimensione ( $1,3 \text{ m} < \text{diametro effettivo} \leq 10 \text{ m}$ ) ad asse verticale, la massima velocità di riempimento deve soddisfare l'equazione:  $vd = N \times 0,5 \text{ m}^2/\text{s}$  per il carico dall'alto o dal basso con un conduttore centrale e  $vd = N \times 0,38 \text{ m}^2/\text{s}$  per il carico dal basso senza un conduttore centrale, dove:

- $v$  (m/s) è la velocità di flusso lineare all'interno del tubo;
- $d$  (m) è il diametro del tubo di riempimento;
- $N$  è un fattore che descrive la dipendenza dalla lunghezza  $L$  del compartimento. Per  $L < 2 \text{ m}$ ,  $N = 1$ ; per  $L$  comprese tra  $2 \text{ m}$  e  $4,6 \text{ m}$ ,  $N = \sqrt{N/2}$  e per  $L$  superiori a  $4,6 \text{ m}$ ,  $N = 1,5$ .

#### 4.5.2 Valutazione del livello di integrità della sicurezza

Si decide di utilizzare un metodo di monitoraggio e controllo di tipo indiretto, mediante la misura dei parametri di vuoto/pressione e del numero dei cicli di lavaggio.

I valori di pressione oggetto di monitoraggio e controllo sono:

*Lavaggio iniziale*

- pressione assoluta minima: 0,2 bar;
- pressione assoluta massima: 1 bar (pressione atmosferica);

*Esercizio*

- pressione relativa al di sotto della quale devono essere intraprese azioni correttive: 10 mbar;
- pressione relativa in corrispondenza della quale **deve corrispondere la messa in sicurezza della macchina: 5 mbar.**

Lo strumento di misura della pressione attualmente installato sulla macchina, in grado di rilevare sia pressioni superiori sia inferiori a quella atmosferica, è costituito da un vuotometro/manometro a quadrante con scala concentrica, conforme alla norma EN 837, con le seguenti caratteristiche:

- campo di misura per combinazione di vuoto e di pressione (bar): -1 ÷ +3;
- classe di precisione: 1 (valore limite di errore  $\pm 1$  % a fondo scala);
- privo di contatti elettrici.

**Si osserva che con tale strumento risulta molto difficile leggere variazioni di pressione nell'ordine dei millibar.**

##### 4.5.2.1 Lavaggio iniziale - Ipotesi 1

Nonostante siano sorte perplessità sull'idoneità dello strumento di misura della pressione attualmente installato, si procede comunque ad una prima valutazione con finalità orientative.

L'inertizzazione avviene manualmente da parte di un operatore esperto, formato, addestrato e del tutto consapevole delle implicazioni degli eventuali errori, che svolge un compito ben progettato e molto praticato, avendo a disposizione un tempo adeguato.

I cicli di vuoto/pressione sono stati preventivamente calcolati e ne **è stata verificata l'efficacia mediante analizzatore di ossigeno portatile.**

La garanzia che le pressioni minime e massime previste siano raggiunte avviene tramite la lettura, da parte dell'operatore, dell'indicazione del vuotometro/manometro installato in prossimità della macchina.

**Sia il raggiungimento dei valori di vuoto/pressione sia i relativi cicli, sono annotati dall'operatore su registro secondo procedura.**

Per la valutazione del livello di integrità della sicurezza - SIL - si utilizza il metodo dell'albero dei guasti (FTA – *Fault Tree Analysis*)<sup>44</sup>.

I tassi di guasto  $\lambda$ <sup>45</sup> necessari per la valutazione sono tratti dalle seguenti fonti:

- Exida - Safety Equipment Reliability Handbook;
- Reliability Information Analysis Center - Nonelectronic Parts Reliability Data;
- Norma CEI EN 61511-3;
- Guida CEI 65-186.

Se i guasti sono casuali, la probabilità di guasto PFD (inaffidabilità) nel tempo si ricava con la seguente legge esponenziale:

$$PFD = 1 - e^{-\lambda t}$$

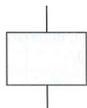
dove:

- $e$  = 2,718 base dei logaritmi naturali  
 $\lambda$  tasso di guasto (supposto costante)  
 $t$  tempo di impegno<sup>46</sup> (o di osservazione) dell'elemento al quale è riferita l'inaffidabilità

<sup>44</sup> L'albero dei guasti è un approccio "dall'alto al basso" (top-down) per descrivere i fallimenti dei sistemi complessi. Questo metodo parte dall'evento principale che è il risultato di un numero di eventi basilari che contribuiscono, o danno inizio, al fallimento del sistema. La logica dell'albero è formata da simboli che rappresentano gli eventi base. Questi sono uniti da simboli AND, OR che rappresentano logicamente gli eventi. Ogni simbolo comune all'albero dei guasti rappresenta perciò un tipo di evento o la sua relazione logica. Questo tipo di analisi può fornire gli elementi per la determinazione del livello SIL richiesto al SIS. Simboli tipici del FTA sono:



**Evento principale:**  
evento indesiderato oggetto dell'analisi



**Evento intermedio:**  
uno stato di guasto conseguente ad altri eventi che agiscono attraverso porte logiche



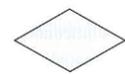
**Porta OR:** l'uscita di una porta OR è attiva se uno qualsiasi degli ingressi è attivo. Quantitativamente le probabilità in uscita sono calcolate sommando le probabilità degli ingressi



**Porta AND:** l'uscita di una porta AND è attiva se tutti gli ingressi sono attivi. Quantitativamente le probabilità in uscita sono calcolate moltiplicando le probabilità degli ingressi



**Evento base:** un guasto di base ad un evento che non richieda ulteriore analisi poiché il suo rateo di guasto o probabilità possono essere determinate

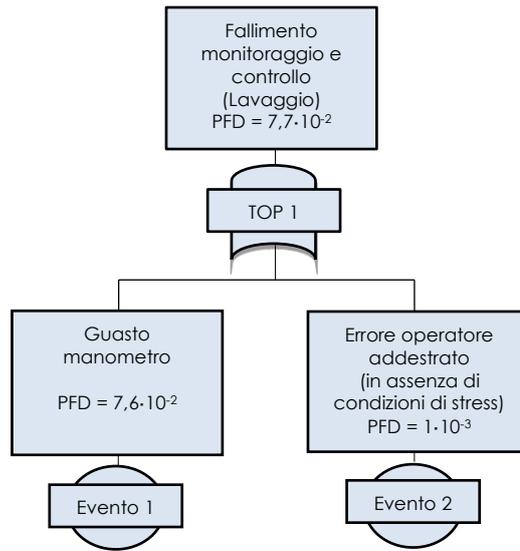


**Evento non sviluppato:** un evento o guasto che non richiede ulteriore sviluppo, spesso perché la sua probabilità è così bassa da non meritare ulteriore considerazione

<sup>45</sup> Il tasso di guasto rappresenta il numero di elementi che si guastano nell'unità di tempo, espresso in "numero di guasti per ora o per anno".

<sup>46</sup> Considerato di un anno, composto da 10.000 ore.

Figura 4.2 - Albero dei guasti - Lavaggio iniziale - Ipotesi 1



La probabilità di fallimento del sistema di monitoraggio e controllo del lavaggio iniziale risulta:  $PFD_{Lavaggio} = 7,7 \cdot 10^{-2}$ .

Con riferimento alla Tabella 3.1 si ottiene **SIL 1**, inferiore all'obiettivo prefissato e quindi da considerarsi non sufficientemente affidabile.

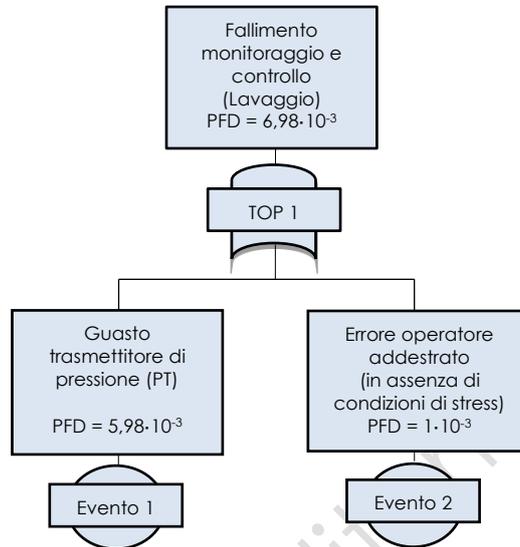
**Inoltre, è opportuno sostituire lo strumento di misura con altro in grado di rappresentare variazioni di pressione nell'ordine dei millibar.**

#### 4.5.2.2 Lavaggio iniziale - Ipotesi 2

Si sostituisce il vuotometro/manometro attualmente installato con un trasmettitore di pressione munito di display, dotato di uscita, al momento non utilizzata, sia con contatto elettrico di commutazione sia analogica (4 ÷ 20 mA).

L'alimentazione della componente elettronica del trasmettitore, scelto con caratteristiche adatte al luogo di installazione, avviene tramite una barriera a sicurezza intrinseca<sup>47</sup>.

Figura 4.3 - Albero dei guasti - Lavaggio iniziale - Ipotesi 2



La probabilità di fallimento del sistema di monitoraggio e controllo del lavaggio iniziale risulta:  $PFD_{Lavaggio} = 6,98 \cdot 10^{-3}$ .

Con riferimento alla Tabella 3.1 si ottiene **SIL 2**, conforme all'obiettivo prefissato (Tabella 4.1):

Tipo di zona	Livello di integrità della sicurezza del sistema di monitoraggio e controllo dell'inertizzazione			
	SIL 3	<b>SIL 2</b>	SIL 1	No SIL
<b>0/20</b>	Zona non pericolosa	<b>2/22</b>	1/21	0/20
1/21	Zona non pericolosa	Zona non pericolosa	2/22	1/21
2/22	Zona non pericolosa	Zona non pericolosa	Zona non pericolosa	2/22

<sup>47</sup> Le interfacce tra il campo e la strumentazione di sala controllo sono chiamate usualmente "barriere"; le barriere a sicurezza intrinseca proteggono i circuiti in area con pericolo di esplosione limitando la tensione e la corrente nelle condizioni di uso normale e di guasto.

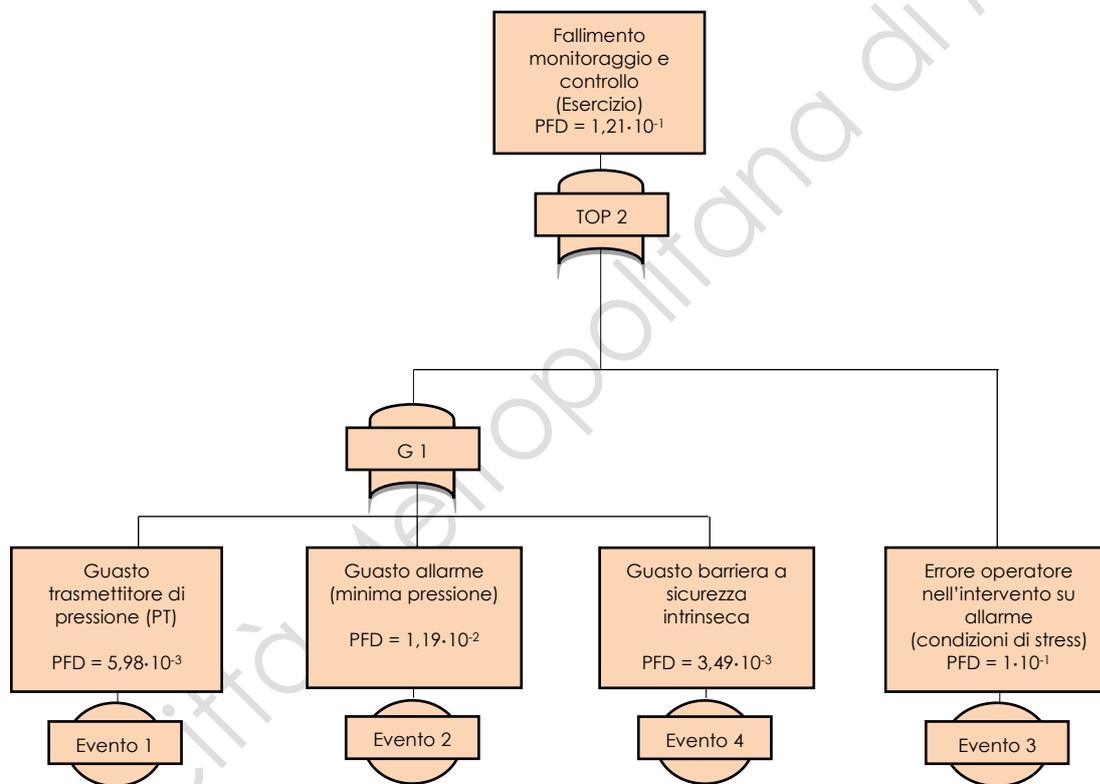
#### 4.5.2.3 Esercizio - Ipotesi 1

Al fine di consentire la messa in sicurezza della macchina in caso di superamento del valore massimo di concentrazione di ossigeno stabilito (< 5%), viene utilizzata l'uscita del trasmettitore di pressione la quale, in corrispondenza del valore di minima pressione impostato, attiva **un sistema di allarme ottico e acustico**. **In caso di allarme interviene l'operatore per la messa in sicurezza della macchina secondo procedura**.

Per evitare l'attivazione dell'allarme durante la fase di lavaggio iniziale, verrà installato un selettore sul circuito elettrico di comando con due posizioni: "lavaggio" ed "esercizio". Il selettore posto nella posizione *lavaggio* inibirà il circuito di comando della macchina e fornirà una segnalazione visiva di stato.

Per una prima valutazione del SIL si utilizza il metodo dell'albero dei guasti in analogia ai casi precedenti.

Figura 4.4 - Albero dei guasti - Esercizio - Ipotesi 1



La probabilità di fallimento del sistema di monitoraggio e controllo durante l'esercizio risulta:  $PFD_{Esercizio} = 1,21 \cdot 10^{-1}$ .

Con riferimento alla Tabella 3.1 **non si ottiene alcun livello SIL**.

#### 4.5.2.4 Esercizio - Ipotesi 2

Viene ripetuta la valutazione affidabilistica ma secondo il metodo delle norme CEI EN 61508 e CEI EN 61511 (rif. § 3.1).

L'affidabilità dei sistemi strumentati di sicurezza basati su una tecnologia elettrica, elettronica o elettronica programmabile, sono complessivamente rappresentabili come indicato in Figura 4.5:

Figura 4.5 – Schema a blocchi di un sistema strumentato di sicurezza



Il metodo consente il calcolo della probabilità media di fallimento su domanda ( $PFD_{avg}$ ) e si basa sulle seguenti assunzioni:

- utilizzo di equazioni semplificate per valutare l'integrità di un sistema strumentato di sicurezza;
- ratei di guasto degli elementi (sottosistemi) costanti per l'intero ciclo di vita;
- stesso rateo di guasto per elementi uguali ridondati;
- rateo di guasto dei sensori, inclusivo di ogni elemento dal modulo di ingresso dello strumento al modulo di ingresso del risolutore logico;
- rateo di guasto del risolutore logico, inclusivo del modulo di ingresso, della logica, del modulo in uscita, delle sorgenti di potenza e normalmente fornito dal fabbricante;
- rateo di guasto degli attuatori, inclusivo di ogni elemento dal modulo d'uscita del risolutore logico fino all'elemento finale stesso;
- intervallo di tempo tra le verifiche e prove (TI – *Time Interval between tests*), molto più breve del tempo medio tra i guasti (MTTF – *Mean Time To Failure*);
- in occasione delle verifiche e prove degli elementi del sistema, tutti i guasti sono rilevati e riparati;**
- sensori e attuatori sono selezionati (possibilmente) a sicurezza positiva (*Fail safe*), ovvero in modo tale da portare l'impianto in uno stato di sicurezza quando disalimentati.

Il metodo prevede una serie di “architetture” (Moon: “M” su “N”)<sup>48</sup> del sistema strumentato di sicurezza che pongono i seguenti limiti al livello di integrità della sicurezza hardware (Tabelle 4.2 e 4.3):

**Tabella 4.2 – Integrità di sicurezza dell'hardware. Vincoli architetturelari per sottosistemi relativi alla sicurezza di Tipo A<sup>49</sup>**

Frazione dei guasti sicuri (SFF) <sup>50</sup>	Tolleranza al guasto hardware		
	0	1	2
< 60%	SIL 1	SIL 2	SIL 3
60% ÷ < 90%	SIL 2	SIL 3	SIL 4
90% ÷ < 99%	SIL 3	SIL 4	SIL 4
> 99%	SIL 3	SIL 4	SIL 4

**Tabella 4.3 – Integrità di sicurezza dell'hardware. Vincoli architetturelari per sottosistemi relativi alla sicurezza di Tipo B<sup>51</sup>**

Frazione dei guasti sicuri (SFF)	Tolleranza al guasto hardware		
	0	1	2
< 60%	Non ammesso	SIL 1	SIL 2
60% ÷ < 90%	SIL 1	SIL 2	SIL 3
90% ÷ < 99%	SIL 2	SIL 3	SIL 4
> 99%	SIL 3	SIL 4	SIL 4

<sup>48</sup> Sistema strumentato di sicurezza, o parte di esso, composto da “N” canali indipendenti connessi in modo tale che “M” canali sono sufficienti per eseguire la funzione strumentata di sicurezza.

<sup>49</sup> Sottosistemi semplici con un ben noto modo di guasto e con una provata storia di funzionamento (sensori, attuatori, risolutori logici non programmabili).

<sup>50</sup>  $SFF = \frac{\sum \lambda_{DD} + \sum \lambda_{SD} + \sum \lambda_{SU}}{\sum \lambda_{DD} + \sum \lambda_{DU} + \sum \lambda_{SD} + \sum \lambda_{SU}}$  [%]

dove:

- $\lambda_{DD}$  tasso dei guasti pericolosi rilevati
- $\lambda_{SD}$  tasso dei guasti sicuri rilevati
- $\lambda_{SU}$  tasso dei guasti sicuri non rilevati
- $\lambda_{DU}$  tasso dei guasti pericolosi non rilevati

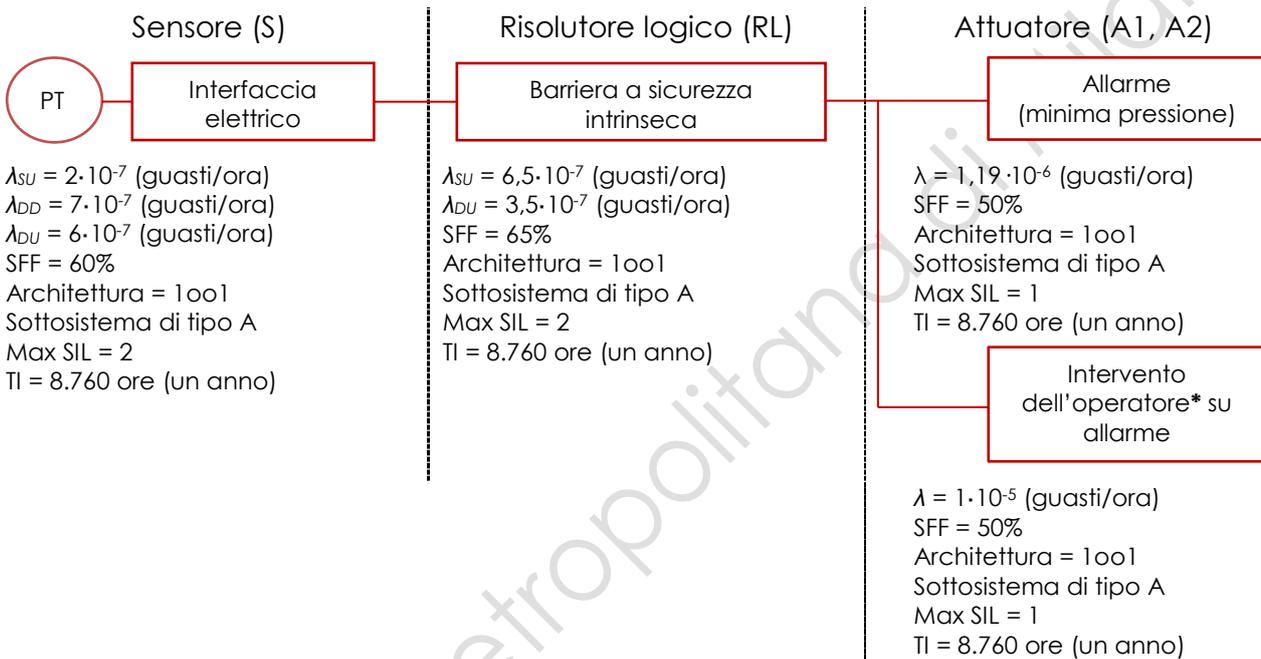
<sup>51</sup> Sottosistemi complessi con modi di guasto potenzialmente sconosciuti (risolutori logici programmabili).

Nel caso specifico il sistema di monitoraggio e controllo è realizzato con (Figura 4.6):

- **Sensore:** un trasmettitore di pressione (PT), con tolleranza al guasto hardware = 0, senza ridondanza (architettura: 1oo1<sup>52</sup>);
- **Risolutore logico:** una barriera a sicurezza intrinseca, con tolleranza al guasto hardware = 0, senza ridondanza (architettura: 1oo1);
- **Attuatore:** un sistema di allarme ottico e acustico cui segue l'intervento di un operatore, con tolleranza al guasto hardware = 0, senza ridondanza (architettura: 1oo1).

Se non diversamente specificato, il tempo medio di riparazione di ogni sottosistema (MTTR - Mean Time To Repair) è assunto pari a 8 ore.

Figura 4.6 – Schema a blocchi – Esercizio - Ipotesi 2



\* Ai soli fini del calcolo, l'operatore è trattato come un "dispositivo elettrico/elettronico"

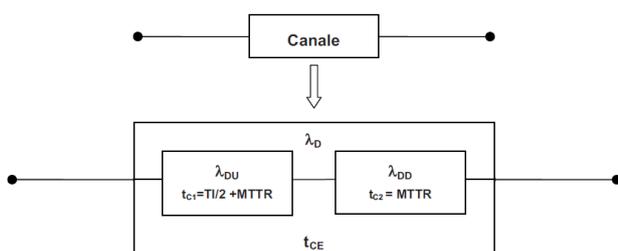
Il PFD<sub>sys</sub> del sistema è dato dalla somma dei PFD dei sottosistemi:

$$PFD_{SYS} = PFD_S + PFD_{RL} + PFD_{A1} + PFD_{A2} = 2,64 \cdot 10^{-3} + 1,54 \cdot 10^{-3} + 2,63 \cdot 10^{-3} + 2,19 \cdot 10^{-2} = 2,87 \cdot 10^{-2}$$

La probabilità di fallimento del sistema di monitoraggio e controllo durante l'esercizio risulta:  $PFD_{Esercizio} = 2,87 \cdot 10^{-2}$ , compatibile con SIL 1 secondo la Tabella 3.1, così come i vincoli architettureali di alcuni sottosistemi.

Si ottiene pertanto **SIL 1**, inferiore all'obiettivo prefissato e quindi da considerarsi non sufficientemente affidabile.

<sup>52</sup> Schema di affidabilità dell'architettura 1oo1:



Dalla figura risulta che il tasso dei guasti pericolosi  $\lambda_D$  è pari a:  
 $\lambda_D = \lambda_{DU} + \lambda_{DD} = \lambda/2$

per cui è possibile calcolare il tempo di guasto equivalente del canale  $t_{CE}$  tramite la relazione:

$$t_{CE} = \frac{\lambda_{DU}}{\lambda_D} \cdot \left( \frac{TI}{2} + MTTR \right) + \frac{\lambda_{DD}}{\lambda_D} \cdot MTTR$$

Pertanto il PFD dell'architettura 1oo1 si può così formulare:  $PFD_{1oo1} = (\lambda_{DU} + \lambda_{DD}) \cdot t_{CE}$

#### 4.5.2.5 Esercizio - Ipotesi 3

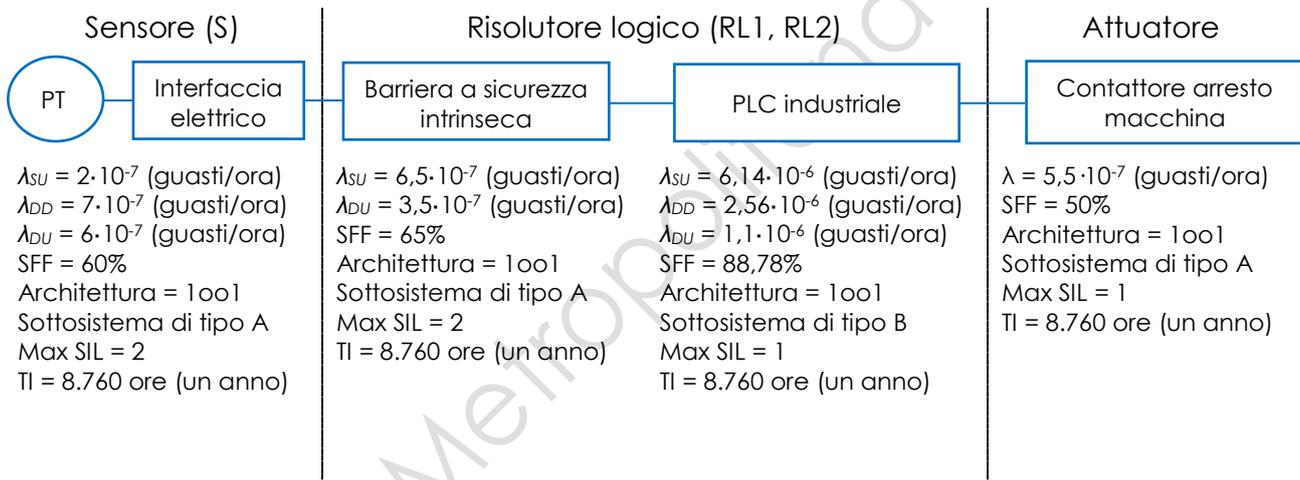
Viene ripetuta la valutazione affidabilistica secondo il precedente metodo (norme CEI EN 61508 e CEI EN 61511), modificando il modo di messa in sicurezza della macchina in caso di superamento del valore massimo di concentrazione di ossigeno stabilito, passando dal sistema con allarme ottico e acustico e intervento dell'operatore, ad un **sistema automatico gestito da un PLC industriale** (non di sicurezza), nell'ottica di una eventuale successiva aggiunta di funzioni di monitoraggio e controllo.

Il sistema di monitoraggio e controllo è realizzato con (Figura 4.7):

- Sensore: un trasmettitore di pressione (PT), con tolleranza al guasto hardware = 0, senza ridondanza (architettura: 1oo1);
- Risolutore logico: una barriera a sicurezza intrinseca, con tolleranza al guasto hardware = 0, senza ridondanza (architettura: 1oo1) in serie ad un PLC industriale, con tolleranza al guasto hardware = 0, senza ridondanza (architettura: 1oo1);
- Attuatore: un contattore sul circuito di alimentazione per l'arresto della macchina, con tolleranza al guasto hardware = 0, senza ridondanza (architettura: 1oo1).

Se non diversamente specificato, l'MTTR di ogni sottosistema è assunto pari a 8 ore.

Figura 4.7 – Schema a blocchi – Esercizio - Ipotesi 3



Il  $PFD_{SYS}$  del sistema è dato dalla somma dei PFD dei sottosistemi:

$$PFD_{SYS} = PFD_S + PFD_{RL1} + PFD_{RL2} + PFD_A = 2,64 \cdot 10^{-3} + 1,54 \cdot 10^{-3} + 4,85 \cdot 10^{-3} + 1,21 \cdot 10^{-3} = 1,02 \cdot 10^{-2}$$

La probabilità di fallimento del sistema di monitoraggio e controllo durante l'esercizio risulta:  $PFD_{Esercizio} = 1,02 \cdot 10^{-2}$  (inferiore al caso precedente), compatibile con SIL 1 secondo la Tabella 3.1, così come i vincoli architettureali di alcuni sottosistemi.

Si ottiene pertanto ancora **SIL 1**, inferiore all'obiettivo prefissato e quindi da considerarsi non sufficientemente affidabile.

#### 4.5.2.6 Esercizio - Ipotesi 4

Viene ripetuta la valutazione affidabilistica sempre secondo il metodo delle norme CEI EN 61508 e CEI EN 61511, ma con la modifica degli elementi che mettono automaticamente in sicurezza la macchina in caso di superamento del valore massimo di concentrazione di ossigeno stabilito, in particolare:

- sostituzione del "Risolutore logico" composto dalla barriera a sicurezza intrinseca e dal PLC industriale, con altro costituito da un **modulo di sicurezza** comprendente la barriera a sicurezza intrinseca (amplificatore isolato), certificato come "componente di sicurezza" secondo la direttiva 2006/42/CE (direttiva Macchine) e con parametri relativi alla sicurezza funzionale attestati dal fabbricante;
- **aggiunta di un contattore in serie** a quello già previsto, sul circuito di alimentazione della macchina.

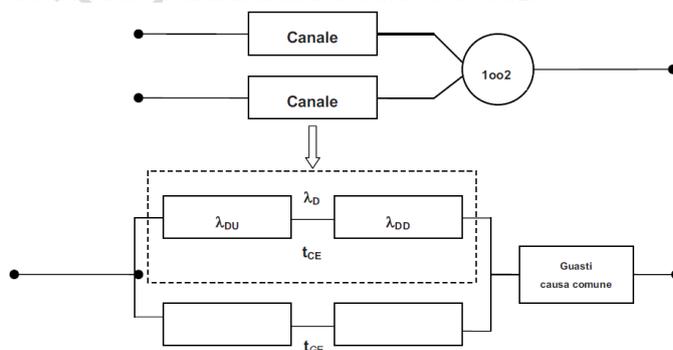
Il sistema di monitoraggio e controllo è realizzato con (Figura 4.8):

- Sensore: un trasmettitore di pressione (PT), con tolleranza al guasto hardware = 0, senza ridondanza (architettura: 1oo1);
- Risolutore logico: un modulo di sicurezza con barriera a sicurezza intrinseca, con tolleranza al guasto hardware = 0, senza ridondanza (architettura: 1oo1), certificato SIL 2;
- Attuatore: due contattori in serie sul circuito di alimentazione per l'arresto della macchina, ognuno con tolleranza al guasto hardware = 0, con ridondanza (architettura: 1oo2).

Se non diversamente specificato:

- l'MTTR di ogni sottosistema è assunto pari a 8 ore;
- per architetture ridondanti (1oo2<sup>53</sup>), il tasso dei guasti di modo e di causa comune non rilevati dalla diagnostica (Fattore  $\beta$ ) è assunto pari al 10%;
- per architetture ridondanti (1oo2), il tasso dei guasti di modo e di causa comune rilevati dalla diagnostica (Fattore  $\beta_D$ ) è assunto pari al 5%.

<sup>53</sup> Schema di affidabilità dell'architettura 1oo2:



Dalla figura risulta che il tempo di guasto equivalente del canale  $t_{GE}$ , corrisponde a quello dell'architettura 1oo1.

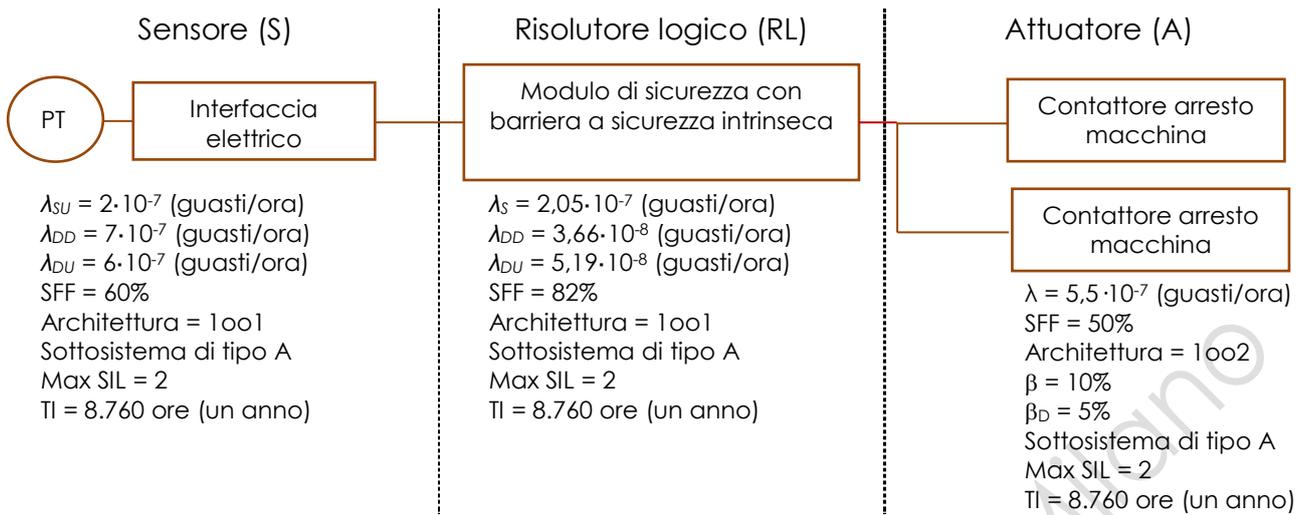
Il tempo di guasto equivalente del sistema è calcolabile tramite la relazione:

$$t_{GE} = \frac{\lambda_{DU}}{\lambda_D} \cdot \left( \frac{TI}{3} + MTTR \right) + \frac{\lambda_{DD}}{\lambda_D} \cdot MTTR$$

Pertanto il PFD dell'architettura 1oo2 si può così formulare:

$$PFD_{1oo2} = 2 \cdot [(1 - \beta_D) \cdot \lambda_{DD} + (1 - \beta) \cdot \lambda_{DU}]^2 \cdot t_{CE} \cdot t_{GE} + \beta_D \cdot \lambda_{DD} \cdot MTTR + \beta \cdot \lambda_{DU} \cdot \left( \frac{TI}{2} + MTTR \right)$$

Figura 4.8 – Schema a blocchi – Esercizio - Ipotesi 4



Il  $PFD_{SYS}$  del sistema è dato dalla somma dei PFD dei sottosistemi:

$$PFD_{SYS} = PFD_S + PFD_{RL} + PFD_A = 2,64 \cdot 10^{-3} + 2,28 \cdot 10^{-4} + 1,21 \cdot 10^{-4} = 2,99 \cdot 10^{-3}$$

La probabilità di fallimento del sistema di monitoraggio e controllo durante l'esercizio risulta:  $PFD_{Esercizio} = 2,99 \cdot 10^{-3}$  (inferiore al caso precedente), compatibile con SIL 2 secondo la Tabella 3.1, così come i vincoli architettureali dei sottosistemi.

Si ottiene pertanto **SIL 2**, conforme all'obiettivo prefissato (Tabella 3.4):

Tipo di zona	Livello di integrità della sicurezza del sistema di monitoraggio e controllo dell'inertizzazione			
	SIL 3	<b>SIL 2</b>	SIL 1	No SIL
<b>0/20</b>	Zona non pericolosa	<b>2/22</b>	1/21	0/20
1/21	Zona non pericolosa	Zona non pericolosa	2/22	1/21
2/22	Zona non pericolosa	Zona non pericolosa	Zona non pericolosa	2/22

Per mantenere tale livello di integrità (affidabilità) nel tempo, si predispone una procedura per **garantire l'effettuazione delle verifiche e prove finalizzate ad eliminare tutti i guasti nei sottosistemi**, secondo l'intervallo di tempo stabilito per ognuno di essi, corrispondente nel caso specifico ad un anno (TI = 8.760 ore).

**4.6 ANALISI E VALUTAZIONE DELLE SORGENTI DI ACCENSIONE**

**4.6.1 Analisi dei requisiti essenziali di sicurezza generali**

<b>Requisiti essenziali di sicurezza generali (rif. direttiva 2014/34/UE, Allegato II) applicati al prodotto preesistente alle direttive ATEX</b>	
<b>1.1</b>	<p style="text-align: center;"><b>Materiali di costruzione</b></p> <p><u>Descrizione dei pericoli</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Alcuni materiali utilizzati nella costruzione dell'apparecchio e dei sistemi di protezione, potrebbero provocare l'innesco di un'esplosione tenuto conto delle sollecitazioni di funzionamento prevedibili.</li> <li>▪ Fra i materiali utilizzati e i componenti dell'atmosfera esplosiva potrebbero prodursi reazioni in grado di deteriorare la situazione esistente per quanto concerne la prevenzione delle esplosioni.</li> <li>▪ La corrosione, l'usura, gli urti e l'invecchiamento potrebbero diminuire l'efficacia dei mezzi di protezione installati sull'apparecchiatura.</li> </ul>
<b>1.2</b>	<p style="text-align: center;"><b>Tenuta ed emissioni</b></p> <p><u>Descrizione dei pericoli</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Possibilità che gli apparecchi ed i sistemi di protezione producano o liberino essi stessi atmosfere esplosive.</li> <li>▪ Emissione di gas o polveri nell'ambiente.</li> <li>▪ Possibilità di esplosione interna.</li> </ul> <p style="text-align: center;"><b>Soluzioni adottate</b></p> <p>L'apparecchiatura lavora a pressione atmosferica ed è dotata di sistemi di chiusura a tenuta per le condizioni di esercizio previste e di cappe di aspirazione in prossimità delle aperture che vengono utilizzate per le attività di caricamento o scaricamento di materie prime e prodotti finiti previste nel ciclo di lavorazione. Dette cappe aspiranti sono adeguate per impedire l'emissione di gas o di polveri nell'ambiente esterno nonché l'ingresso di atmosfera potenzialmente esplosiva dall'esterno. In particolare nel seguito sono esaminate le protezioni adottate.</p> <p><u>Albero di trasmissione agitatore</u></p> <p>L'albero di trasmissione del moto rotatorio dell'agitatore è dotato di tenute meccaniche che garantiscono una tenuta affidabile nel tempo. Il sistema di tenuta viene controllato periodicamente per verificarne l'efficienza e sostituito secondo quanto riportato nel manuale d'uso. Periodicamente viene verificata anche la centralina oleodinamica utilizzata per il sollevamento della pala di agitazione.</p> <p><u>Corpo della macchina</u></p> <p>Il corpo della macchina è progettato per l'esercizio in pressione ad una pressione massima di 0,5 bar ed è adatto al funzionamento sottovuoto. Tutti i bocchelli sono dotati di guarnizioni compatibili con le sostanze impiegate, serrati in modo da garantire la tenuta per le condizioni di progetto previste. Sul boccaporto è presente un finecorsa che attiva automaticamente l'aspirazione ogni volta che lo stesso viene aperto.</p> <p><u>Orifici di riempimento e svuotamento</u></p> <p>Il caricamento del solvente è fatto attraverso tubazioni fisse con dosaggio automatico della quantità voluta per mezzo di contatore volumetrico e valvola di intercettazione servoazionata. La polvere viene caricata manualmente da sacchi e/o fustini attraverso il boccaporto dosandola per pesatura. Durante la fase di carico polveri, sul boccaporto viene installata uno scivolo (tramoggia) di carico utilizzato per facilitare le operazioni ed è attivata automaticamente l'aspirazione per evitare possibili dispersioni di polvere nell'ambiente di lavoro. L'operazione di miscelazione avviene a macchina chiusa e sfiata in atmosfera in zona sicura. Lo scarico del prodotto avviene attraverso la valvola di fondo attuata, aperta attraverso la pressione di un pulsante posizionato nelle vicinanze della macchina. Il prodotto lavorato viene trasferito tramite una pompa ad un altro apparecchio per mezzo di manichette flessibili di tipo dissipativo. All'interno della macchina può essere presente un'atmosfera esplosiva dovuta ai vapori dei solventi infiammabili caricati e aria. Questa atmosfera, nelle condizioni di normale esercizio, è confinata all'interno dell'apparecchio tranne che in occasione dell'apertura del boccaporto per le operazioni di caricamento e di campionamento. In queste occasioni, come per il caricamento di polveri, è prevista l'attivazione automatica, comandata da un finecorsa di prossimità sul boccaporto, di cappe di aspirazione installate in prossimità del boccaporto stesso che provvedono alla captazione e alla diluizione, ampiamente al di sotto dei LEL, dei vapori e delle</p>

Attività 222 – Verifiche attrezzature di lavoro e impianti  
**QUADERNO TECNICO – INERTIZZAZIONE ATMOSFERE ESPLOSIVE**

		<p>polveri che non sono quindi emessi nell'ambiente di lavoro, ma convogliati all'esterno in zone sicure. La corrente polverosa è aspirata da un sistema indipendente da quello per i vapori ed è trattata con filtro a maniche prima dello scarico in atmosfera.</p> <p>La macchina è dotata di arrestatore di fiamma installato all'estremità della linea che convoglia, all'esterno dell'ambiente di lavoro in zona sicura, gli sfati dell'apparecchio durante le operazioni di caricamento con il boccaporto chiuso. Detta linea ha la funzione di polmonazione dell'apparecchio sia per pressione che depressione.</p> <p>In base alla classificazione dell'apparecchiatura ed ai sistemi di protezione adottati, la valutazione dei rischi non ha identificato una probabilità di esplosione tale da richiedere sistemi di protezione contro esplosioni interne.</p>
1.3	<p><b>Sovraccarico degli apparecchi</b></p> <p><u>Descrizione dei pericoli</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Condizioni di sovraccarico.</li> <li>▪ Difetti di funzionamento.</li> <li>▪ Transitori di avviamento e arresto.</li> <li>▪ Arresto di emergenza.</li> </ul>	<p><b>Soluzioni adottate</b></p> <p>Il motore della macchina è dotato di protezione elettrica con blocco in caso di anomalo assorbimento di corrente dovuto a possibili eccessive dissipazioni di energia nel prodotto da parte dell'agitatore.</p> <p>L'impianto è presidiato continuamente durante le fasi di lavorazione e le materie prime sono dosate automaticamente se provenienti da linee fisse.</p> <p>Non sono stati evidenziati impieghi errati ragionevolmente prevedibili dell'apparecchio che introducano pericoli aggiuntivi a quelli esaminati per il funzionamento normale o in presenza di disfunzioni prevedibili.</p> <p>L'impianto opera in maniera discontinua, quindi le operazioni di avviamento e arresto sono frequenti, ma non introducono pericoli aggiuntivi.</p> <p>L'impianto è dotato di pulsanti di emergenza che ne garantiscono l'arresto sicuro.</p>
1.4	<p><b>Depositi di polvere</b></p> <p><u>Descrizione dei pericoli</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Accensione di depositi di polvere sulla superficie dell'apparecchio.</li> </ul>	<p><b>Soluzioni adottate</b></p> <p>La macchina non raggiunge, nelle condizioni di esercizio considerate e con il margine di sicurezza richiesto, in alcuna parte una temperatura superficiale tale da provocare l'accensione delle polveri che si possono essere depositate.</p> <p>Sono in essere procedure di lavoro e raccomandazioni per la pulizia periodica delle apparecchiature al fine di evitare accumuli di polveri che non devono superare i 5 mm (vincolo per garantire che <math>T_{max}</math> superficiale sia inferiore di almeno 75 °K a quella di accensione del deposito di polvere).</p>
1.5	<p><b>Istruzioni per l'uso</b></p> <p><u>Descrizione dei pericoli</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Utilizzo erraneo o oltre i limiti del progetto.</li> </ul>	<p><b>Soluzioni adottate</b></p> <p>Sono disponibili istruzioni scritte per quanto riguarda le operazioni da svolgere durante le normali attività produttive ed in particolare le procedure di sicurezza per le operazioni che espongono l'operatore ad atmosfere esplosive (caricamento materie prime, messa a terra di attrezzature da usare in presenza di atmosfera esplosiva, ecc.).</p> <p>Gli operatori conoscono le procedure, le applicano ed hanno ricevuto l'addestramento relativo con verifica dell'apprendimento.</p>
1.6	<p><b>Manutenzione</b></p> <p><u>Descrizione dei pericoli</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Usura o rottura di parti.</li> </ul>	<p><b>Soluzioni adottate</b></p> <p>In conformità ad un <u>preciso obbligo giuridico</u> per la sicurezza sui luoghi di lavoro (D.Lgs. 81/2008, Codice Civile), sono in essere procedure di manutenzione (programmata e correttiva) delle apparecchiature (attrezzature di lavoro) e degli impianti secondo l'esperienza, le istruzioni dei fabbricanti e le norme tecniche, tali da impedire il verificarsi di usura o rottura di parti che creino pericoli, compreso quello di accensione di un'atmosfera esplosiva.</p>
1.7	<p><b>Perturbazioni esterne</b></p> <p><u>Descrizione dei pericoli</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Variazioni ambientali che alterino le condizioni di funzionamento.</li> </ul>	<p><b>Soluzioni adottate</b></p> <p>La macchina è progettata e fabbricata per svolgere in sicurezza la funzione per la quale è prevista, anche in presenza delle prevedibili variazioni ambientali, di tensioni parassite, di umidità, di vibrazioni, di inquinamenti o di altre perturbazioni esterne, nel rispetto delle indicazioni del fabbricante.</p>

**4.6.2 Analisi delle sorgenti di accensione interne (I) ed esterne (E)**

N.	Pericolo d'innesco		Valutazione della frequenza di accadimento senza applicare misure aggiuntive					Misure applicate per evitare che la sorgente d'innesco divenga efficace			Frequenza di accadimento con le misure applicate					
	a	b	a	b	c	d	e	a	b	c	a	b	c	d	e	f
	Potenziale sorgente d'accensione	Descrizione della causa	Durante il normale funzionamento	Durante guasti prevedibili	Durante guasti rari	Non considerata	Motivi della valutazione	Descrizione delle misure applicate/ <i>non presenti, eventualmente da applicare</i>	Riferimenti	Documentazione tecnica	Durante il normale funzionamento	Durante guasti prevedibili	Durante guasti rari	Non considerata	Categoria ATEX equivalente (Dust-Gas)	Limitazioni necessarie
1	Scariche elettrostatiche	Parti conduttrici elettricamente isolate da terra	X				Le parti conduttrici isolate formano un condensatore che, ad esempio, può essere caricato per induzione	Equipotenzialità delle parti e collegamento a terra della macchina	- ISO80079-36 - CLC/TR 60079-32-1	- Specifiche dei materiali - Registrazione della verifica del collegamento a terra				X	1GD I/E	
2	Scariche elettrostatiche	Parti isolanti, es. materiali non metallici		X			Nessuna carica durante le normali operazioni; le parti isolanti sono sul lato esterno; potrebbero essere caricate dal personale (nel funzionamento)	- Resistenza superficiale $\leq 1 \text{ G}\Omega$ a 23 °C con il 50% di umidità relativa - Parti fissate alla struttura della macchina collegata a terra - Non è prevista la formazione di scariche propagantesi a spazzola	- ISO80079-36 - CLC/TR 60079-32-1	- Specifiche dei materiali - Disegni costruttivi				X	1GD E	

Attività 222 – Verifiche attrezzature di lavoro e impianti  
**QUADERNO TECNICO – INERTIZZAZIONE ATMOSFERE ESPLOSIVE**

3	Scariche elettrostatiche	Parti isolanti, es. materiali non metallici	X			Nessuna carica durante le normali operazioni; le parti isolanti sono sul lato esterno; potrebbero essere caricate dal personale (nel funzionamento)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- La superficie esposta è <math>\leq 100 \text{ cm}^2</math></li> <li>- Non è prevista la formazione di scariche propagantesi a spazzola</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ISO80079-36</li> <li>- CLC/TR 60079-32-1</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Specifiche dei materiali</li> <li>- Disegni costruttivi</li> </ul>			X	1GD E	IIA
4	Scariche elettrostatiche	Carica elettrostatica del liquido durante il flussaggio/agitazione	X			I liquidi possono accumulare carica elettrostatica nelle normali condizioni operative	<ul style="list-style-type: none"> <li>- I materiali con i quali si trovano in contatto i liquidi nel sistema di contenimento e di trasporto (macchina, tubazioni, pompe, ecc.) sono conduttivi o dissipativi e collegati a terra (resistenza per unità di lunghezza compresa tra <math>10^3</math> e <math>10^6 \Omega/\text{m}</math>)</li> <li>- La velocità di flusso del liquido durante il riempimento è <math>&lt; 1 \text{ m/s}</math> nella fase iniziale e <math>&lt; 3,5 \text{ m/s}</math> nelle fasi successive considerando il carico dal basso senza conduttore centrale, con tubi di diametro <math>d=0,1 \text{ m}</math> e lunghezza del recipiente <math>L &lt; 2 \text{ m}</math></li> <li>- La macchina è riempita tramite tubo in materiale conduttivo o dissipativo e collegato a terra, esteso fino quasi al fondo e diretto verso la parete per limitare gli spruzzi, evitando immissioni per caduta</li> <li>- Dopo il riempimento, si attende un tempo <math>\geq 120 \text{ s}</math> prima di avviare la macchina (tempo di decadimento della carica)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- CLC/TR 60079-32-1</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Specifiche dei materiali</li> <li>- Disegni costruttivi</li> <li>- Registrazione della verifica del collegamento a terra</li> <li>- Procedure di lavoro</li> </ul>			X	1GD I	

Attività 222 – Verifiche attrezzature di lavoro e impianti  
**QUADERNO TECNICO – INERTIZZAZIONE ATMOSFERE ESPLOSIVE**

5	Superfici calde	Attrito tra l'albero e l'interno del recipiente			X	La macchina è stata progettata e costruita secondo la buona pratica ingegneristica e con gli opportuni coefficienti di sicurezza per le parti soggette a flessione	Non sono richieste misure aggiuntive	- ISO80079-36 - ISO80079-37	- Specifiche tecniche			X	1GD I		
6	Superfici calde	Rottura dei cuscinetti sull'albero o sul riduttore di velocità con influenza sul lato interno (il cuscinetto è ubicato in zona 1 vicino alla piastra di separazione con la zona 0 interna)			X	La rottura di un cuscinetto deve essere considerato un guasto raro se vengono applicate adeguate misure manutentive (successiva colonna)	- I cuscinetti sono lubrificati e sostituiti secondo le istruzioni del fabbricante - La presenza di lubrificante viene periodicamente verificata - <i>Il malfunzionamento del cuscinetto viene rilevato da un sensore termico: temperatura massima &lt; 150 °C (IPL 1; tipo di protezione b1 - SIL 1)</i>	- ISO80079-36 - ISO80079-37 - <i>ISO80079-37</i> - <i>EN61508</i>	- Registrazione delle ore di funzionamento - Procedure di manutenzione - Disegni costruttivi - <i>Documentazione del sistema di monitoraggio</i>			X	X	2GD I/E 1GD I/E	T3
7	Superfici calde	Riscaldamento da attrito della girante e delle tenute in moto relativo			X	Il riscaldamento non supera l'80% della classe di temperatura T4 (135 °C) nelle normali condizioni di funzionamento La mancanza di lubrificazione delle tenute meccaniche deve essere considerato un guasto raro se vengono applicate adeguate misure manutentive (successiva colonna)	- Le tenute sono lubrificate e sostituite secondo le istruzioni del fabbricante - La presenza di lubrificante viene periodicamente verificata - La massima temperatura superficiale è stata rilevata sperimentalmente nelle peggiori condizioni operative - <i>Un malfunzionamento viene rilevato da un sensore termico: temperatura massima &lt; 100 °C (IPL 1; tipo di protezione b1 - SIL 1)</i>	- ISO80079-36 - ISO80079-37 - <i>ISO80079-37</i> - <i>EN61508</i>	- Registrazione delle ore di funzionamento - Procedure di manutenzione - Disegni costruttivi - Rapporto di prova termica - <i>Documentazione del sistema di monitoraggio</i>			X	X	2GD I/E 1GD I/E	T4

Attività 222 – Verifiche attrezzature di lavoro e impianti  
**QUADERNO TECNICO – INERTIZZAZIONE ATMOSFERE ESPLOSIVE**

8	Scintille meccaniche	Scintille generate meccanicamente a causa della rottura dell'albero dovuta a vibrazioni inaccettabili			X	La macchina non è progettata per il funzionamento a vuoto; non può essere escluso un uso errato	- Sono disponibili istruzioni scritte e gli operatori conoscono le procedure, le applicano ed hanno ricevuto l'addestramento relativo con verifica dell'apprendimento <i>- Il livello del liquido viene rilevato con un sistema di monitoraggio (IPL 1; tipo di protezione b1 - SIL 1)</i>	- ISO80079-36 <i>- ISO80079-37</i> - EN61508	- Procedure di lavoro <i>- Documentazione del sistema di monitoraggio</i>			X	X	2GD I/E 1GD I/E
9	Scintille meccaniche	Contatto tra l'albero o la girante e l'interno del recipiente			X	Il recipiente è fisso e può pertanto essere escluso un contatto dovuto alla mancata centratura	- La minima distanza tra gli elementi in rotazione ed il recipiente è definita nel progetto - La macchina può funzionare solo con il recipiente chiuso e bloccato in una posizione definita	- ISO80079-36	- Specifiche tecniche				X	1GD I
10	Scintille meccaniche	La rottura del cuscinetto di guida dell'albero può portare a contatto la girante con l'interno del recipiente			X	La rottura di un cuscinetto deve essere considerato un guasto raro se vengono applicate adeguate misure manutentive (successiva colonna)	- Il cuscinetto è lubrificato e sostituito secondo le istruzioni del fabbricante - La presenza di lubrificante viene periodicamente verificata <i>- Il guasto del cuscinetto viene rilevato con un sistema di monitoraggio delle vibrazioni (IPL 1; tipo di protezione b1 - SIL 1)</i>	- ISO80079-36 <i>- ISO80079-37</i> - EN61508	- Registrazione delle ore di funzionamento - Procedure di manutenzione - Disegni costruttivi <i>- Documentazione del sistema di monitoraggio</i>			X	X	2GD I/E 1GD I/E
11	Scintille meccaniche	Allentamento dell'albero			X	Giunzioni non assicurate	La forza di bloccaggio delle giunzioni è assicurata con elementi anti-allentamento	- ISO80079-36 - ISO80079-37	- Specifiche dei materiali				X	1GD I/E
12	Scintille meccaniche	Durata inaccettabile dei materiali, es. dell'albero			X	Possibile corrosione	- Materiali idonei all'uso - Uso secondo le indicazioni del fabbricante	- ISO80079-36 - ISO80079-37	- Specifiche dei materiali				X	1GD I/E

Attività 222 – Verifiche attrezzature di lavoro e impianti  
**QUADERNO TECNICO – INERTIZZAZIONE ATMOSFERE ESPLOSIVE**

13	Scintille meccaniche	Vibrazioni inaccettabili del recipiente possono causare danni alla macchina			X	Non possono essere escluse vibrazioni interne ed esterne	- Uso secondo le indicazioni del fabbricante - Rispetto delle limitazioni poste dal fabbricante (che ha individuato la velocità critica)	- ISO80079-36 - ISO80079-37	- Specifiche dei materiali - Dati di targa - Procedure di manutenzione			X	1GD I/E	
14	Scintille meccaniche	Ingresso accidentale di elementi metallici, come attrezzi dal boccaporto			X	In assenza di liquido possono prodursi scintille multiple	Sono disponibili istruzioni scritte e gli operatori conoscono le procedure, le applicano ed hanno ricevuto l'addestramento relativo con verifica dell'apprendimento		- Procedure di lavoro			X	1GD I/E	
15	Scintille meccaniche	Rottura di elementi elastici			X	La rottura di molle ed elementi elastici deve essere considerato un guasto raro	Il limitatore di coppia è posto sul lato esterno e non necessita di lubrificazione		- Scheda tecnica			X	2GD E	
16	Scintille meccaniche	Impatto meccanico sul lato esterno			X	Urti accidentali	- Non sono presenti leghe leggere con oltre il 7,5 % di magnesio per massa - Le caratteristiche di installazione fanno escludere impatti con elementi a velocità $\geq 1$ m/s ed energia $\geq 500$ J	- ISO80079-36	- Specifiche dei materiali - Disegni di installazione			X	1G E	
17	Scintille elettriche	Apparecchi elettrici sul lato esterno			X	Le apparecchiature elettriche sono idonee per la zona pericolosa in cui sono installate	- Verificate: · buone condizioni generali · modi di protezione Ex idonei · conformità alle norme applicabili · verifiche e manutenzioni · presenza e corretta taratura delle protezioni elettriche	EN60079-14 EN60079-17	- Dichiarazioni CE di conformità dei prodotti - Dichiarazioni di conformità L.46/90 o DM7/08 - Schemi elettrici - Registro controlli manutentivi - Verbali verifiche periodiche			X	2GD E	IIB T3

Attività 222 – Verifiche attrezzature di lavoro e impianti  
**QUADERNO TECNICO – INERTIZZAZIONE ATMOSFERE ESPLOSIVE**

18	Fulmini	Non applicabile																		
19	Correnti vaganti	Non applicabile																		
20	Fiamme e gas caldi	Non applicabile																		
21	Radio frequenze (RF) e onde elettromagnetiche e da 104 a 3x1012 Hz	Non applicabile																		
22	Onde elettromagnetiche e da 3x1012 a 1x1015 Hz	Non applicabile																		
23	Radiazioni ionizzanti	Non applicabile																		
24	Ultrasuoni	Non applicabile																		
25	Compressioni adiabatiche ed Onde d'urto	Non applicabile																		
17	Reazioni esotermiche compresa l'autoignizione della polvere	Non applicabile																		

#### 4.6.3 Valutazione delle sorgenti di accensione

Dall'analisi condotta sulla macchina preesistente alla direttiva ATEX 94/9/CE, risulta una Categoria ATEX "equivalente" 2 GD (Gas, Dust) sia sul lato interno che sul lato esterno, idonea, rispettivamente, per zona 1/21 e quindi sovrabbondante per la zona 2/22 residua. Ulteriori misure dovrebbero invece essere adottate se il lato interno fosse classificato zona 0/20, come in origine prima dell'utilizzo della tecnica dell'inertizzazione.

#### 4.7 VALUTAZIONE FINALE DEL RISCHIO DI ESPLOSIONE

Applicando nuovamente la Tabella 3.3 al caso in esame (lato interno della macchina) si ottiene:

1	2	3
Elementi valutati	Probabilità/Frequenza	Valore
Formazione di atmosfera esplosiva	Zona	2 (2, 22)
IPL 1: prevenzione formazione atmosfera esplosiva	SIL	NA
Presenza di una sorgente di accensione efficace (EUC)	FT	1
IPL 2: prevenzione accensione atmosfera esplosiva	SIL	NA
IPL 3: mitigazione effetti dell'esplosione	SIL	NA
		$\sum(I) = 3$
NA: non applicabile		

L'esito della valutazione è favorevole.

Le condizioni di sicurezza devono essere mantenute nel tempo e non necessitano ulteriori misure.

Verranno definiti e suggeriti interventi di miglioramento volti all'ulteriore riduzione dei rischi, i quali comprenderanno misure di prevenzione e protezione come:

- misure strutturali, ovvero riferite a impianti, macchine, apparecchiature e ambiente di lavoro;
- misure gestionali, basate sull'elaborazione di procedure e istruzioni di lavoro, analisi e misure di approfondimento, programmi di manutenzione;
- intervento formativo, relativo ai fabbisogni di informazione, formazione e addestramento dei lavoratori;
- misure correlate alla necessità di rafforzamento dell'uso di DPI e di miglioramento della cartellonistica con messaggi relativi a prescrizioni o informazioni di sicurezza.

## 5. RISCHI CONNESSI ALL'UTILIZZO DELL'AZOTO - CENNI

L'aria ha la seguente composizione:

- 78% di azoto (N<sub>2</sub>);
- 20,9% di ossigeno (O<sub>2</sub>);
- 0,8% di argon (Ar);
- 0,3% di anidride carbonica (CO<sub>2</sub>) e acqua (H<sub>2</sub>O).

Questi gas non sono tossici ma la variazione delle loro concentrazioni relative interviene sui processi respiratori e sulla combustione. Se un qualunque gas, fisiologicamente inerte, si aggiunge o si miscela all'atmosfera che respiriamo la concentrazione di ossigeno diminuisce e si ottiene una sotto-ossigenazione.

Gli infortuni, spesso mortali, connessi all'utilizzo dell'azoto in campo industriale, piuttosto che alle condizioni tipiche di utilizzo (bassa temperatura e alta pressione) sono causati dall'impovertimento di ossigeno a seguito di rilascio di azoto in ambiente.

L'azoto è disponibile industrialmente come gas ad alta purezza e viene comunemente utilizzato sia come fluido refrigerante e per applicazioni criogeniche grazie al suo elevato calore di evaporazione sia come inertizzante per il controllo del rischio di esplosione/incendio.

Le caratteristiche intrinseche di tale gas (gas inodore e incolore, coefficiente di espansione liquido/gas pari a 1:700) e quelle legate alle modalità di stoccaggio e utilizzo (temperature criogeniche, pressioni di circa 15 bar) rendono l'azoto particolarmente pericoloso; i principali fattori di rischio sono i seguenti:

### 1. Bassa temperatura.

L'utilizzo di un fluido a temperature criogeniche presenta, di norma, due principali fattori di rischio. Il primo è legato al potenziale infragilimento dei contenitori; l'errata definizione della temperatura di progetto di questi rispetto alle condizioni di utilizzo dell'azoto risulta, infatti, essere una delle principali cause di incidente. Il secondo fattore di rischio è costituito dal contatto accidentale del personale con superfici a temperature criogeniche, contatto che provoca sulla pelle lesioni del tutto simili alle ustioni (l'entità del danno aumenta con il diminuire della temperatura e con il prolungarsi della durata del contatto).

### 2. Sovrapressione.

Per quanto riguarda l'alta pressione di stoccaggio, il rischio, genericamente, è legato al malfunzionamento dei riduttori di pressione, e alla conseguente possibilità di pericolose sovrapressioni nelle apparecchiature di utilizzo (rischio limitato dall'installazione di valvole di sicurezza a valle dei riduttori di pressione).

3. Asfissia.

L'ultimo rischio, ma certamente quello più elevato in termini di frequenza di accadimenti incidentali, è quello legato al pericolo di asfissia conseguente alla dispersione di azoto in ambienti sospetti d'inquinamento o confinati<sup>54</sup> (in questi casi è necessario adempiere agli obblighi previsti dal DPR 14.09.2011 n. 177).

Notoriamente l'azoto non è "intrinsecamente" tossico o nocivo nel senso tradizionale del termine ma un aumento della sua concentrazione, non rilevabile poiché il gas è incolore ed inodore, può causare asfissia a causa della conseguente riduzione della percentuale di ossigeno in ambiente.

Nella tabella seguente si riportano gli effetti della concentrazione di ossigeno sull'uomo [CSB, 2006 citato da M. Marigo, 2012]:

Percentuale di ossigeno (% vol/vol)	Effetti e sintomi
23,5	Massimo livello di sicurezza. Il 23% è il livello di allarme per molti sensori di ossigeno in commercio.
21	Tipica concentrazione dell'ossigeno nell'aria.
19,5	Minimo livello di sicurezza. Il 19% è il livello di allarme per molti sensori di ossigeno in commercio.
15 ÷ 19	Primi segnali di ipossia. Diminuzione delle abilità al lavoro. Possono essere indotti sintomi di particolare gravità in persone con problemi coronari, polmonari e di circolazione.
12 ÷ 14	La respirazione aumenta con lo sforzo, tachicardia, marcata diminuzione del coordinamento muscolare, della percezione. Confusione mentale.
10 ÷ 12	La respirazione aumenta in velocità e profondità. Confusione mentale. Labbra blu.
8 ÷ 10	Nausea, vomito, svenimento. Incoscienza. Volto cinereo. Labbra azzurre.
6	6 minuti – 50% di probabilità di morte. 8 minuti – 100% di probabilità di morte.
4	Coma in 40 secondi, convulsioni. Cessazione della respirazione. Morte.
0	Perdita di conoscenza al secondo respiro. In pochi minuti danno cerebrale irreversibile. Morte.

Le più comuni sorgenti di emissione di azoto nell'industria sono rappresentate da valvole, riduttori di pressione, connessioni rapide, attacchi di laboratorio, sfianti di processo, bombole di azoto gassoso, serbatoi di stoccaggio azoto liquido fissi o carrellati.

In condizioni incidentali le sostanze possono fuoriuscire dai sistemi di contenimento secondo diverse modalità in relazione alle caratteristiche di stoccaggio e alla velocità di emissione. Le sostanze possono essere emesse in ambiente sotto forma di gas/vapore (singola fase), di liquido che evapora in modo trascurabile nell'emissione (singola fase), di liquido che evapora massivamente in seguito al rilascio (modalità tipica dei gas liquefatti).

Per la stima della portata di azoto emessa a seguito di perdita dai sistemi di contenimento, in via analogica può essere fatto riferimento alle formule riportate nella Guida CEI 31-35:2012, *Atmosfere esplosive. Guida alla classificazione dei luoghi con pericolo di esplosione per la presenza di gas in applicazione della Norma CEI EN 60079-10-1 (CEI 31-87)*.

Sebbene la guida si riferisca alla classificazione delle aree a rischio esplosione secondo le direttive ATEX, in essa vengono forniti modelli generali per la stima di perdite di gas e liquidi da flange, tubazioni, ecc.

A fini puramente orientativi, si propone di seguito un calcolo di massima **basato sulla sopraccitata Guida CEI 31-35**, con il quale si intende determinare la concentrazione

<sup>54</sup> Possibile definizione: uno spazio circoscritto, caratterizzato da accessi e uscite difficoltosi o limitati, da una ventilazione naturale sfavorevole, nel quale, in presenza di agenti pericolosi (ad. es. gas, vapori, polveri, atmosfere esplosive, agenti biologici, rischio elettrico, ecc.) o in carenza di ossigeno o per difficoltà di evacuazione o di comunicazione con l'esterno, può verificarsi un infortunio grave o mortale.

media di ossigeno all'interno di un ambiente a seguito del rilascio di azoto dal sistema di contenimento, correlata al numero di ricambi d'aria nell'ambiente stesso.

Non viene invece determinata la distanza dalle sorgenti di emissione di azoto entro le quali la concentrazione di ossigeno potrebbe essere inferiore al valore medio calcolato.

Una vera e propria classificazione delle zone di asfissia, in analogia alle zone con pericolo di esplosione, non è al momento prevista da alcuna norma tecnica comunitaria.

### 5.1 ESEMPIO DI CALCOLO

Si consideri un ambiente chiuso con volume libero  $V_a$  di 100 m<sup>3</sup>, contenente un impianto di distribuzione dell'azoto a pressione assoluta non superiore a 251.325 Pa (2,5 bar).

L'azoto può fuoriuscire dal sistema di contenimento, all'interno del quale è allo stato gassoso, a bassa velocità in regime subsonico (non turbolento) o ad alta velocità in regime di flusso sonico (turbolento). La velocità di emissione del gas è sonica se la pressione all'interno del contenitore è più alta della  $p_c$  (pressione critica) che può essere ricavata con la formula [f.GB.4.1-1] seguente:

$$p_c = p_a \cdot \left(\frac{\gamma + 1}{2}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} = 101.325 Pa \cdot \left(\frac{1,4 + 1}{2}\right)^{\frac{1,4}{1,4 - 1}} = 191.801,05 Pa$$

dove:

$p_a$  = 101325 Pa      pressione atmosferica dell'ambiente considerato  
 $\gamma$  = 1,4              indice politropico dell'espansione adiabatica (rapporto tra i calori specifici:  $C_p/C_v$ )

La pressione assoluta all'interno del sistema di contenimento è maggiore della pressione critica (251.325 Pa > 191.801 Pa).

Per definire la portata di emissione di gas con velocità di emissione sonica si applica la formula [f.GB.4.1-3] seguente:

$$Q_g = S \cdot p \cdot C_d \sqrt{\gamma \cdot \frac{M}{R \cdot T} \cdot \left(\frac{2}{\gamma + 1}\right)^{(\gamma + 1)/2 \cdot (\gamma - 1)}}$$

$$= 2,5 \cdot 10^{-6} mm^2 \cdot 251.235 Pa \cdot 0,8 \sqrt{1,4 \cdot \frac{28,01 kg / kmol}{8314 J / kmol \cdot K \cdot 293 K} \cdot \left(\frac{2}{1,4 + 1}\right)^{(1,4 + 1)/2 \cdot (1,4 - 1)}} = 1,17 \cdot 10^{-3} kg / s$$

dove, oltre a quanto già visto:

$S$  = 2,5 · 10<sup>-6</sup> mm<sup>2</sup>      sezione (area) del foro di emissione ipotizzato su una flangia  
 $p$  = 251.325 Pa              pressione assoluta all'interno del sistema di contenimento nel punto di emissione  
 $C_d$  = 0,8                      coefficiente di scarico o efflusso in caso di fori regolari  
 $M$  = 28,01 kg/kmol        massa molare dell'azoto  
 $R$  = 8314 J/Kmol·K        costante universale dei gas  
 $T$  = 293 K                      temperatura di riferimento

Ipotizzando un dato numero di ricambi d'aria nell'unità di tempo ( $C_a$ ) all'interno del volume libero totale dell'ambiente  $V_a$ , la portata di ventilazione  $Q_a$  è ricavata dalla formula [f.5.6.3-1]:

$$C_a = \frac{Q_a}{V_a} \quad \text{da cui} \quad Q_a = V_a \cdot C_a = 100 m^3 \cdot 2,78 \cdot 10^{-4} s^{-1} = 2,78 \cdot 10^{-2} m^3 / s$$

dove, oltre a quanto già visto:

$V_a$  = 100 m<sup>3</sup>                      volume libero dell'ambiente considerato  
 $C_a$  = 2,78 · 10<sup>-4</sup> s<sup>-1</sup>              numero di ricambi di aria nell'unità di tempo (s) riferito al volume libero dell'ambiente  $V_a$ , corrispondenti ad un ricambio di aria all'ora

Sia per gli ambienti aperti sia per quelli chiusi, dalla formula [f.5.10.3-1b], si ricava la concentrazione *media di azoto a regime*  $C_{N2v}$  corrispondente alla portata effettiva di aria di ventilazione  $Q_a$  che interessa il volume  $V_a$  considerato.

$$C_{N2v} = \frac{Q_g \cdot 100}{\rho_{gas} \cdot k \cdot Q_a} \cdot \frac{T_a}{293} = \frac{1,17 \cdot 10^{-3} \text{ kg/s} \cdot 100}{\frac{1,25 \text{ kg}}{\text{m}^3} \cdot 0,5 \cdot 2,78 \cdot \frac{10^{-2} \text{ m}^3}{\text{s}}} \cdot \frac{293}{293} = 6,72 \%$$

dove, oltre a quanto già visto:

$\rho_{gas}$	= 1,25 kg/m <sup>3</sup>	densità (massa volumica) del gas all'interno del sistema di contenimento
$k$	= 0,5	coefficiente (fattore) di sicurezza applicato a $Q_a$ per la definizione della concentrazione media di azoto a regime nell'ambiente considerato
$T_a$	= 293 K	temperatura dell'ambiente considerato

A tale concentrazione di azoto corrisponde la seguente concentrazione *media di ossigeno a regime*  $C_{O2v}$ , espressa in percento del volume:

$$C_{O2v} = 0,21 \cdot (100 - C_{N2v}) = 0,21 \cdot (100 - 6,72\%) = 19,59 \%$$

ATS Città Metropolitana di Milano





### **ALLEGATO C - BIBLIOGRAFIA**

1. Alicino M., Ferroni L., Lazzaro O., *Valutazione dei rischi connessi con gli usi industriali dell'azoto*, 2008.
2. Coord. R. L. Rogers, *The rase project - explosive atmosphere: risk assessment of unit operations and equipment (EU project n. SMT4-CT97-2169)*, prima edizione, Germania, Commissione Europea, 2000.
3. Dir. 1994/9/CEE del 23 marzo 1994, *concernente il ravvicinamento delle legislazioni degli Stati membri relative agli apparecchi e sistemi di protezione destinati a essere utilizzati in atmosfera potenzialmente esplosiva*.
4. Dir. 1999/92/CE del 16 dicembre 1999, *relativa alle prescrizioni minime per il miglioramento della tutela della sicurezza e della salute dei lavoratori che possono essere esposti al rischio di atmosfere esplosive (quindicesima direttiva particolare ai sensi dell'articolo 16, paragrafo 1, della direttiva 89/391/CEE)*.
5. Dir. 2006/42/CE del 17 maggio 2006, *relativa alle macchine e che modifica la direttiva 95/16/CE (rifusione)*.
6. Dir. 2014/34/UE del 26 febbraio 2014, *concernente l'armonizzazione delle legislazioni degli Stati membri relative agli apparecchi e sistemi di protezione destinati a essere utilizzati in atmosfera potenzialmente esplosiva (rifusione)*.
7. DLgs 12 giugno 2003 n. 233, *Attuazione della direttiva 1999/92/CE relativa alle prescrizioni minime per il miglioramento della tutela della sicurezza e della salute dei lavoratori esposti al rischio di atmosfere esplosive*.
8. DLgs 9 aprile 2008 n. 81, *Testo Unico sulla Salute e Sicurezza sul Lavoro*.
9. DLgs 27 gennaio 2010 n. 17, *Attuazione della direttiva 2006/42/CE, relativa alle macchine e che modifica la direttiva 95/16/CE relativa agli ascensori*.
10. DLgs 19 maggio 2016 n. 85, *Attuazione della direttiva 2014/34/UE concernente l'armonizzazione delle legislazioni degli Stati membri relative agli apparecchi e sistemi di protezione destinati ad essere utilizzati in atmosfera potenzialmente esplosiva*.
11. DPR 23 marzo 1998 n. 126, *Regolamento recante norme per l'attuazione della direttiva 94/9/CE in materia di apparecchi e sistemi di protezione destinati ad essere utilizzati in atmosfera potenzialmente esplosiva*.
12. F. Di Tosto, *Il rischio esplosione e le direttive ATEX*, prima edizione, Italia, ISPESL – Il Sole 24 ORE SpA, 2008.
13. G.M. International Srl, *Sistemi di sicurezza strumentati*, Italia.
14. Guida CEI 31-56:2007, *Costruzioni per atmosfere esplosive per la presenza di polveri combustibili. Guida all'applicazione della Norma CEI EN 61241-10 (CEI 31-66) "Classificazione delle aree dove sono o possono essere presenti polveri esplosive"*.
15. Guida CEI 65-186:2010, *Linea guida per l'applicazione della Norma della serie CEI EN 61511. Sicurezza funzionale. Sistemi strumentati di sicurezza per il settore dell'industria di processo*.
16. Guida CEI 31-35:2012, *Atmosfere esplosive. Guida alla classificazione dei luoghi con pericolo di esplosione per la presenza di gas in applicazione della Norma CEI EN 60079-10-1 (CEI 31-87)*.
17. Guida CEI 31-56;V1:2012, *Atmosfere esplosive. Guida alla classificazione dei luoghi con pericolo di esplosione per la presenza di polveri combustibili in applicazione della Norma CEI EN 60079-10-2 (CEI 31-88)*.
18. Health & Safety Laboratory, Contract SMT4-CT98-2255, *Final Report Determination of Safety Categories of Electrical Devices used in Potentially Explosive Atmospheres (SAFEC)*, GB, 2000.
19. M. Marigo, *La sicurezza del lavoro negli spazi confinati*, Italia, IPSOA – INDICITALIA, 2012.
20. M. Marigo, *La manutenzione di macchine e impianti: sicurezza e affidabilità*, Italia, EPC editore, 2012.

21. M. Marigo, *Rischio atmosfere esplosive. Classificazione, Valutazione, Prevenzione, Protezione*, seconda edizione, Italia, IPSOA – INDICITALIA, 2013.
22. Norme serie CEI EN 61340, *Elettrostatica*.
23. Norme serie CEI EN 61508, *Sicurezza funzionale dei sistemi elettrici, elettronici ed elettronici programmabili per applicazioni di sicurezza*.
24. Norme serie CEI EN 61511, *Sicurezza funzionale. Sistemi strumentali di sicurezza per il settore dell'industria di processo*.
25. Norma CEI EN 60079-10-1:2010, *Atmosfere esplosive. Parte 10-1: Classificazione dei luoghi. Atmosfere esplosive per la presenza di gas*.
26. Norma CEI EN 60079-10-2:2010, *Atmosfere esplosive. Parte 10-2: Classificazione dei luoghi - Atmosfere esplosive per la presenza di polveri combustibili*.
27. Norma UNI EN 1127:2011, *Atmosfere esplosive. Prevenzione dell'esplosione e protezione contro l'esplosione - Parte 1: Concetti fondamentali e metodologia*.
28. Norma UNI EN 13237:2012, *Atmosfere potenzialmente esplosive. Termini e definizioni per apparecchi e sistemi di protezione destinati ad essere utilizzati in atmosfere potenzialmente esplosive*.
29. Norme serie UNI CEI EN ISO 80079, *Atmosfere esplosive*.
30. Perry-Green, *Perry's chemical engineers' handbook*, ottava edizione, James O. Maloney, 2008.
31. Rapporto Tecnico CEI CLC/TR 60079-32-1, *Atmosfere esplosive. Parte 32-1: Pericoli da fenomeni elettrostatici - Guida*.
32. Technical Report CEN/TR 15281:2006, *Guidance on Inerting for the Prevention of Explosions*.