

# POLITECNICO DI TORINO

Collegio di Ingegneria Chimica e dei Materiali

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

Tesi di Laurea Magistrale

## **Sviluppo di metodi di valutazione del rischio d'incendio nell'industria di processo**



### **Relatori**

Prof. Marmo Luca

Dott. Danzi Enrico

### **Candidato**

Manera Cristina

Dicembre 2020

# Indice

Indice	i
Premessa	ii
1. Introduzione	1
2. Descrizione del metodo SW&HI	3
2.1 Calcolo del parametro B1	6
2.2 Calcolo del parametro B2	13
2.3 Calcolo del parametro A	13
3. Effetto dei fattori F sull'indice SW&HI	16
3.1 Effetto del fattore energetico F1	16
3.2 Effetto dei fattori energetici F2 e F3	17
3.2.1 Variazione del volume di sostanza pericolosa nell'apparecchiatura	17
3.2.2 Variazione della temperatura operativa	25
3.2.3 Variazione della pressione operativa	30
3.3 Effetto del fattore energetico F4	37
4. Adattamento del metodo SW&HI al Decreto Legislativo 08/03/2006	38
5. Applicazione del metodo SW&HI	41
6. Studio delle fonti d'innesco	54
6.1 Quantificazione dei parametri dell'equazione della probabilità di non innesco	60
6.1.1 Superfici calde, gas caldi e particelle calde	62
6.1.2 Fiamme libere	63
6.1.3 Scintille meccaniche	64
6.1.4 Archi elettrici	65
6.1.5 Correnti vaganti e protezione catodica	66
6.1.6 Elettricità statica	66
6.1.7 Radio frequenze da $10^4$ Hz a $10^{11}$ Hz e onde elettromagnetiche da $3 \cdot 10^{11}$ Hz a $3 \cdot 10^{15}$ Hz	67
6.1.8 Radiazioni ionizzanti	67
6.1.9 Ultrasuoni	67
6.1.10 Compressione adiabatica e onde d'urto	68
6.1.11 Reazioni esotermiche	68
7. Applicazione dello studio delle fonti d'innesco	69
8. Osservazioni e conclusioni	75
9. Bibliografia	81
10. Ringraziamenti	83
<b>ALLEGATO A</b>	<b>84</b>
<b>ALLEGATO B</b>	<b>89</b>



## **Premessa**

Il lavoro è stato svolto in collaborazione con la Società di Consulenza TECSA in Via Figino, 101-20016 Pero (MI) che ha fornito le informazioni necessarie per il raggiungimento degli obiettivi preposti.

La società è stata fondata nel 1979 da Carlo Fiorentini e svolge consulenze nell'ambito della sicurezza sul posto di lavoro, in particolar modo sull'ingegneria dell'antincendio. In tale ambito, l'azienda ha assunto un'elevata importanza a livello italiano. L'attività di consulenza viene effettuata principalmente alle aziende soggette al D.Lgs 105/15 (c.d. Legge Seveso): si analizzano tutti i possibili sviluppi di scenari incidentali e si verifica se il livello di sicurezza dell'azienda sia sufficientemente elevato. Nel lavoro svolto ho valutato il livello di sicurezza di un'azienda italiana che produce un elevato quantitativo di sostanze chimiche utilizzate per la produzione di polimeri, nel campo della cosmetica ed in altri settori industriali.



# 1. Introduzione

L'obiettivo del lavoro svolto è di sviluppare un metodo innovativo di valutazione del rischio incendio e/o esplosione per l'industria di processo, sviluppato a partire dal metodo SW&HI (Safety Weighted Hazard Index) [1]. Normalmente, una valutazione di rischio incendio e/o esplosione evidenzia le apparecchiature che possono generare uno scenario incidentale indesiderato o le condizioni che si devono verificare in un'apparecchiatura per sviluppare uno scenario incidentale. Affinché si verifichi un incendio oppure un'esplosione, la sequenza incidentale più frequente comporta il rilascio di una nube di sostanza pericolosa ed un successivo innesco. Quindi, per sviluppare un modello innovativo, abbiamo deciso di studiare in maniera più approfondita le fonti d'innesco in modo da poter affiancare ad una mappatura delle apparecchiature maggiormente a rischio incendio e/o esplosione anche una mappatura delle fonti d'innesco, identificando le aree di un'azienda soggette ad una maggiore probabilità di sviluppo di incendi e/o di esplosioni.

Nel decreto legislativo del 9 aprile 2008, il rischio è definito come “*probabilità di raggiungimento del livello potenziale di danno nelle condizioni di impiego o di esposizione ad un determinato fattore o agente oppure alla loro combinazione*” [2]. Per effettuare l'analisi del rischio, come indicato nel decreto, bisogna stilare un documento che specifichi tutti i casi in cui si può sviluppare uno scenario incidentale [3]. Tutti gli scenari incidentali devono essere analizzati con lo stesso metodo e per ognuno di essi si devono evidenziare:

- le condizioni nelle quali esso si sviluppa;
- il quantitativo delle persone, dei beni e dell'ambiente che potrebbe coinvolgere;
- i danni che comporta alle persone, ai beni e all'ambiente circostante;
- le misure di prevenzione adottate per ridurre i pericoli che generano rischi significativi.

Inoltre, le soluzioni adottate devono essere spiegate in maniera semplice, comprensibile e facilmente realizzabili, altrimenti si deve suddividere il materiale in diversi moduli, in modo da rendere più comprensibili le soluzioni adottate [3]. Esse devono essere:

- flessibili;
- standardizzate;
- conformi con gli standard nazionali e internazionali.

Il documento deve essere basato su uno studio, una valutazione ed un utilizzo sistematico dei risultati della ricerca scientifica (sia nazionale, sia internazionale) nell'ambito della sicurezza d'interesse e deve essere costantemente aggiornato [3]. Tali documenti devono essere presenti per legge in quelle industrie definite "a rischio d'incidente rilevante", ovvero sottostanti alla c.d. direttiva "Seveso" [4], vigente nel D.Lgs 105/2015 [5], poiché svolgono dei processi che potenzialmente possono generare uno scenario incidentale di grande magnitudo.

Per identificare le apparecchiature maggiormente a rischio incendio e/o esplosione, si è applicato il metodo SW&HI (Safety Weighted Hazard Index) [1]: si analizzano tutte le apparecchiature di un sito industriale contenenti delle sostanze infiammabili/esplosive/tossiche per determinare l'ampiezza dell'area aziendale interessata da un eventuale rilascio. La nube di sostanza pericolosa generata da tale rilascio è in grado di sviluppare un incendio o un'esplosione interagendo con una fonte d'innesco, ad eccezione di alcuni casi in cui la nube si auto accende. Quando l'ampiezza di quest'area risulta troppo estesa, si prevede una soluzione impiantistica adatta a ridurre tale area. È stata anche valutata l'influenza di alcuni fattori e parametri presenti nel metodo nel determinare l'indice SW&HI.

Il D. Lgs. 08/03/2006 identifica 13 possibili fonti d'innesco [3]:

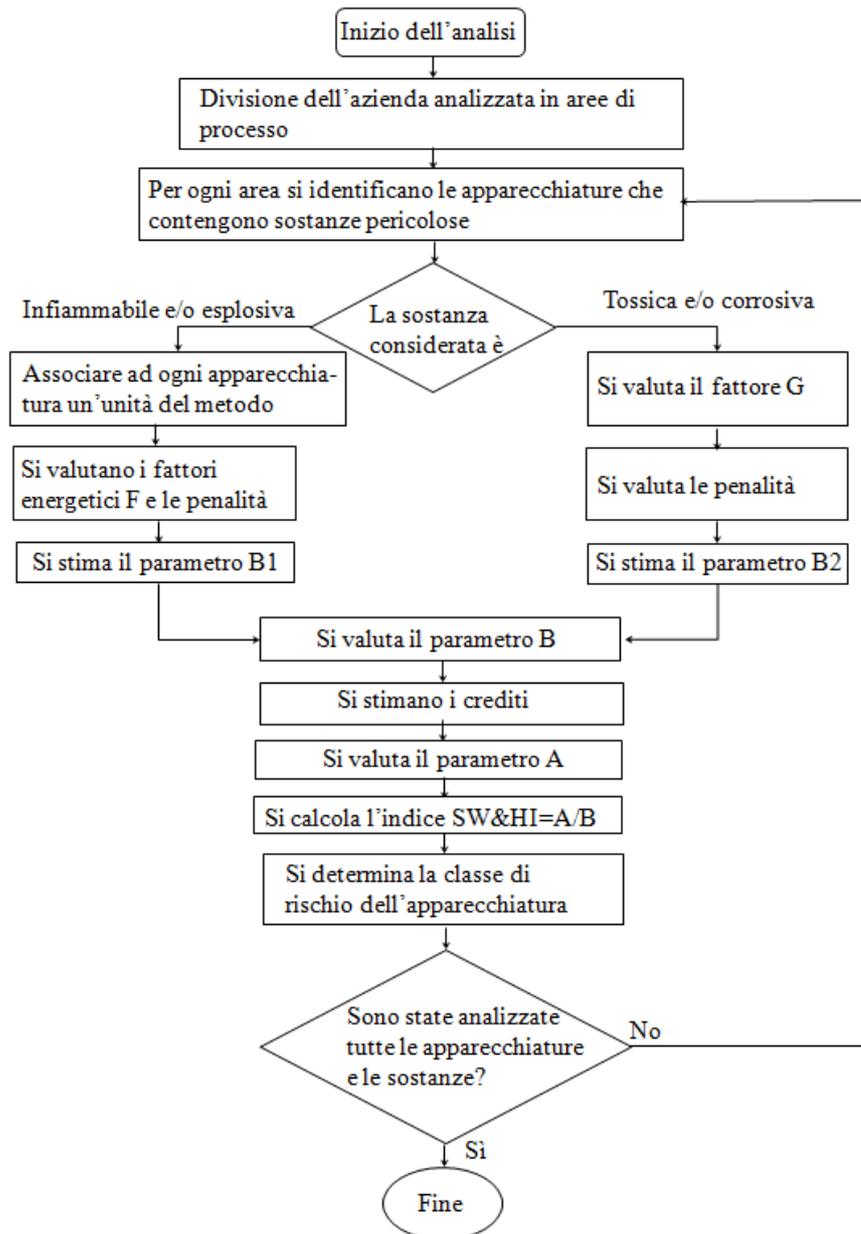
- superfici calde;
- fiamme, gas e particelle calde;
- scintille di origine meccanica;
- materiali ed impianti elettrici;
- correnti vaganti e protezione catodica;
- elettricità statica;
- fulmini;
- radio frequenze da  $10^4$  Hz a  $10^{11}$  Hz;
- onde elettromagnetiche da  $3 \cdot 10^{11}$  Hz a  $3 \cdot 10^{15}$  Hz;
- radiazioni ionizzanti;
- ultrasuoni;
- compressione adiabatica e onde d'urto;
- reazioni esotermiche.

Per ogni singola fonte del D. Lgs. 08/03/2006 si è calcolata la probabilità di non innesco adottando l'approccio formulato da Taylor J. R. [6] in modo da poter valutare (come complemento ad uno) la frequenza con la quale una nube di sostanza pericolosa genera un incendio o in un'esplosione.

Il metodo SW&HI e l'analisi parallela delle potenziali sorgenti d'innesco sono stati applicati ad un caso studio concernente un impianto di produzione di specialty chemicals e additivi polimerici per poterne verificare l'idoneità e la completezza.

## 2. Descrizione del metodo SW&HI

Il metodo SW&HI è stato sviluppato nel 2001 da Khan, Husain ed Abbasi con l'obiettivo di identificare le apparecchiature pericolose in uno stabilimento industriale [1]. Per effettuare l'analisi del rischio si è deciso di utilizzare questo metodo in quanto semplifica il processo di valutazione, rendendolo meno oneroso (in termini di tempi di valutazione). Inoltre, è molto versatile ed è facilmente applicabile a realtà industriali ed a lavori di ricerca [1]. Il metodo SW&HI può essere schematizzato con un diagramma di flusso (**Figura 2.1** tratta da [1] con modifiche).



**Figura 2.1** : Diagramma di flusso che rappresenta la logica del metodo SW&HI.

Se si analizza una sostanza infiammabile e/o esplosiva si deve associare l'apparecchiatura contenente tale sostanza con una delle unità logiche previste dall'algoritmo SW&HI [1] (**Tabella 2.1**).

**Tabella 2.1.** Significato delle unità logiche del metodo SW&HI.

Unità logica	Significato
Stoccaggio	Unità in cui si raccoglie una sostanza, la quale può essere una materia prima, un prodotto o un intermedio di processo in seguito inviato ad altre apparecchiature
Trasformazione fisica	Unità in cui avvengono trasformazioni di tipo fisico (trasporto di calore, di materia, ecc.) o di espansione/compressione di gas
Reazione chimica	Unità in cui avvengono le principali reazioni chimiche del processo industriale
Trasporto	Unità tramite la quale si trasporta una sostanza chimica da un'unità ad un'altra unità
Altre unità	Unità che comprende le unità ausiliari, come unità di produzione vapore, scambiatori di calore, fornaci e tutto ciò che non può rientrare nelle altre quattro classi

Per identificare tutte le apparecchiature per le quali si deve applicare il metodo, è opportuno avere una descrizione dettagliata ed aggiornata della produzione considerata. Le proprietà elencate in **Tabella 2.2.** sono utilizzate per determinare il valore dei vari indici e fattori che caratterizzano il metodo.

**Tabella 2.2.** Input al metodo SW&HI.

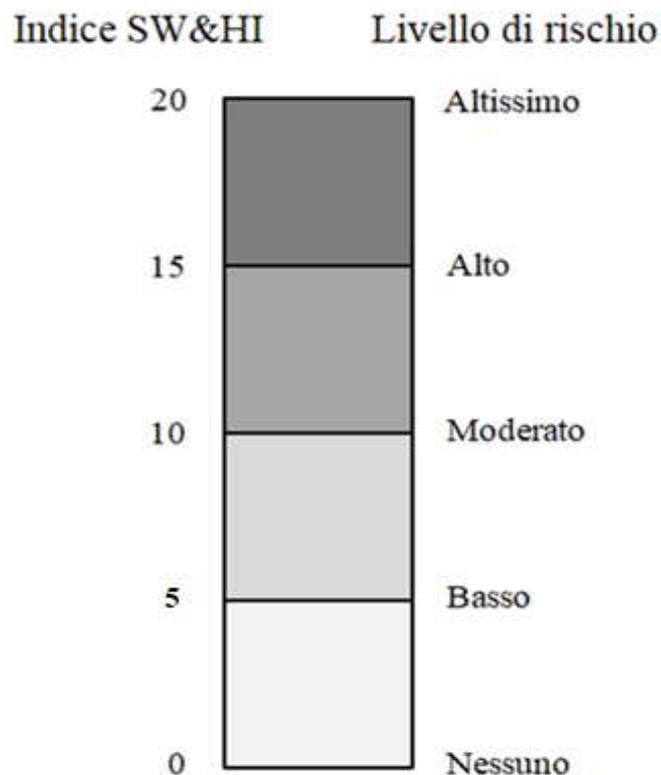
Simbolo	Proprietà	Unità di misura
M	Massa della sostanza contenuta nell'apparecchiatura analizzata	Kg
Hc	Calore di combustione della sostanza infiammabile	kJ/mol
Hrxn	Calore di reazione	kJ/kg
V	Volume di sostanza contenuta nell'apparecchiatura analizzata	m <sup>3</sup>
PP	Pressione operativa dell'apparecchiatura analizzata	kPa
VP	Tensione di vapore della sostanza infiammabile	kPa
AP	Pressione atmosferica	kPa
PT	Temperatura operativa dell'apparecchiatura analizzata	°C
FIP	Flash point Temperature	°C
FiT	Fire Temperature	°C
TAI	Temperatura di autoaccensione	°C

Le informazioni su alcune proprietà sono fornite direttamente dall'azienda, come ad esempio la massa, la pressione e la temperatura di processo. Altre proprietà (come il calore di combustione e la tensione di vapore) vengono ricavate dalle schede di sicurezza tramite il numero di CAS che è identificativo di ogni sostanza. Le schede di sicurezza sono raccolte in apposite banche dati, quali il sito CAMEO [7]. Se su tale sito non si trovano tutte le informazioni necessarie, si amplia la ricerca su siti analoghi [8]. Il volume di sostanza pericolosa contenuta all'interno dell'apparecchiatura è:

- un parametro noto, se viene fornito dall'azienda;
- calcolabile come rapporto tra massa e densità, nota la massa caricata nell'apparecchiatura (se si tratta di un serbatoio, tale rapporto viene moltiplicato per 0,8 dato che, di solito, il massimo riempimento è pari all'80% del riempimento totale).

Per ogni apparecchiatura contenente una sostanza pericolosa (infiammabile, esplosiva o tossica), si valuta il rispettivo indice SW&HI che rappresenta il raggio dell'area in cui avvengono dei danni moderati (50% di danni a strutture e persone) durante lo sviluppo di un incendio [1]: se l'indice SW&HI risultasse pari a 5, il 50% di strutture e di persone presenti in un'area di 5 m di raggio dal punto di sversamento subiscono dei danni moderati. In questo modo, in accordo con il metodo, è possibile determinare il livello di rischio di un'apparecchiatura (**Figura 2.2** tratta da [1] con modifiche):

- l'indice SW&HI pari a 0, assenza di rischio;
- l'indice minore di 5, basso rischio;
- indice compreso tra 5 e 10, rischio moderato;
- indice compreso tra 10 e 15, rischio alto;
- indice compreso tra 15 e 20 rischio altissimo.



**Figura 2.2** : Rappresentazione grafica della dipendenza del livello di rischio in funzione dell'indice SW&HI.

L'indice SW&HI non risulta mai pari a 0 in quanto non esiste alcuna attività in cui non sia presente alcun rischio [9].

Per valutare l'indice SW&HI [1] si calcola il rapporto tra il parametro  $B$  e il parametro  $A$ :  $B$  rappresenta la magnitudo dei danni che un'apparecchiatura è potenzialmente in grado di causare ed è quantificato sottoforma di penalità ( $pn_i$  o  $pnr_i$ );  $A$  è relativo alle misure di controllo e di sicurezza presenti nell'azienda per contrastare lo sviluppo di eventi indesiderati ed è quantificato sottoforma di crediti ( $cr_i$ ).

$$SW\&HI = B/A \quad (2.1)$$

$B$  è la somma di  $B1$  e di  $B2$  [1]:  $B1$  considera il danno procurato da un incendio e/o esplosione dovuti da una dispersione di sostanze infiammabili e/o esplosive, mentre  $B2$  si riferisce alla dispersione di sostanze tossiche.

$$SW\&HI = (B1 + B2)/A \quad (2.2)$$

## 2.1 Calcolo del parametro $B1$

Il parametro  $B1$  [1] è in funzione dell'*Hazard Potential* ( $HP$ ):

$$B1 = 4,76 * HP^{1/3} \quad (2.3)$$

Per determinare  $HP$  si deve identificare in quale fase si può verificare il rilascio della sostanza infiammabile e/o esplosiva in esame. Infatti, l'algoritmo dal quale si ricava questo parametro varia a seconda della tipologia di unità logica che si sta considerando (**Tabella 2.3.**) [1].

**Tabella 2.3.** Algoritmo dell'*Hazard potential* ( $HP$ ) in base alla tipologia di unità logica.

Unità logica	Hazard Potential (HP)	
Stoccaggio	$HP = (F1*pn1+F*pn2)*pn3*pn4*pn5*pn6*pn7*pn8$	(2.4)
Trasformazione fisica	$HP = (F1*pn1+F*pn2)*pn3*pn4*pn5*pn6*pn7*pn8$	(2.5)
Reazione chimica	$HP = (F1*pn1+F*pn2+F4*pn9*pn10)*pn3*pn4*pn5*pn6*pn7*pn8$	(2.6)
Trasporto	$HP = (F1*pn1+F2*pn2)*pn3*pn4*pn5*pn6*pn7*pn8*pn9$	(2.7)
Altre unità	$HP = F1*pn1*pn2*pn3*pn4*pn5*pn6*pn7*pn8$	(2.8)

Le penalità che compaiono nell'algoritmo dell'*Hazard Potential* assumono valori diversi a seconda della tipologia di unità logica e, in alcuni casi, assumono anche significati differenti (**Tabella 2.4.** e **Tabella 2.5.**) [5].

**Tabella 2.4.** Significato delle penalità per le unità logiche di stoccaggio, di trasformazione fisica e di reazione chimica.

Penalità	Unità di stoccaggio	Unità di trasformazione fisica	Unità di reazione chimica
<i>pn1</i>	effetto della temperatura	effetto della temperatura	effetto della temperatura
<i>pn2</i>	effetto della pressione	effetto della pressione	effetto della pressione
<i>pn3</i>	distanza tra le unità	quantità di sostanza	quantità di sostanza
<i>pn4</i>	quantità di sostanza	effetto di infiammabilità/reazione	effetto di infiammabilità/reazione
<i>pn5</i>	effetto di infiammabilità/reazione	distanza tra le unità	distanza tra le unità
<i>pn6</i>	densità delle unità in un sito	densità delle unità in un sito	densità delle unità in un sito
<i>pn7</i>	effetto catastrofi esterne	effetto fattori esterni	effetto fattori esterni
<i>pn8</i>	vulnerabilità dell'area	vulnerabilità dell'area	vulnerabilità dell'area
<i>pn9</i>	-	-	natura della reazione
<i>pn10</i>	-	-	tipologia delle reazioni indesiderate

**Tabella 2.5.** Significato delle penalità per le unità logiche di trasporto e altre unità.

Penalità	Unità di trasporto	Altre unità
<i>pn1</i>	effetto della temperatura	effetto del tipo di sostanza
<i>pn2</i>	effetto della pressione	stato fisico della sostanza
<i>pn3</i>	quantità di sostanza	quantità di sostanza
<i>pn4</i>	effetto di infiammabilità o di reazione	effetto di infiammabilità o di reazione
<i>pn5</i>	stato fisico della sostanza	distanza tra le unità
<i>pn6</i>	distanza tra le unità	densità delle unità in un sito
<i>pn7</i>	densità delle unità in un sito	effetto fattori esterni
<i>pn8</i>	effetto fattori esterni	vulnerabilità dell'area
<i>pn9</i>	vulnerabilità dell'area	-
<i>pn10</i>	-	-

Per esempio, ad eccezione delle "*altre apparecchiature*", le penalità *pn1* e *pn2* sono rispettivamente relative all'effetto della temperatura e della pressione di esercizio; invece, per le "*altre apparecchiature*" queste due penalità sono relative alle caratteristiche chimico-fisiche della sostanza in esame. Per quanto riguarda le restanti penalità, esse assumono un significato diverso in funzione della tipologia di unità logica considerata (**Tabella 2.4.** e **Tabella 2.5.**) [1]. I parametri *F* e *F1* sono definiti fattori energetici: *F1* è indipendente dalle condizioni operative dell'apparecchiatura; *F* equivale a *F2* o a *F3* o alla loro somma in base alle condizioni operative dell'apparecchiatura (*F2* e *F3* sono altri fattori energetici presenti nel metodo) [1].

$$F1 = 0,1 * M * Hc / K \quad (2.9)$$

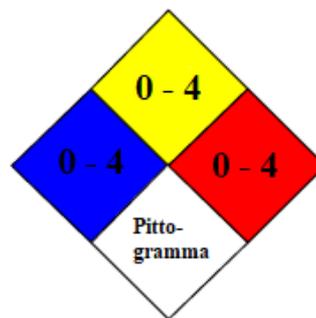
$$F2 = 6 / K * PP * V \quad (2.10)$$

$$F3 = 0,001 * \frac{1}{(T + 273,15)} * (PP - VP)^2 * V \quad (2.11)$$

Le condizioni operative di un'apparecchiature determinano il valore delle penalità  $pn1$  e  $pn2$ , ad eccezione per le "altre unità": la temperatura di esercizio viene confrontata con la temperatura di flash point e la temperatura di autoaccensione; la pressione di esercizio è relazionata alla tensione di vapore della sostanza analizzata e alla pressione atmosferica [1]. Note le condizioni operative si può calcolare il fattore energetico  $F$ , fondamentale per la quantificazione dell'*Hazard Potential*. La distanza tra le unità valuta se le apparecchiature che contengono sostanze pericolose siano sufficientemente distanziate, per evitare un eventuale effetto domino; la densità delle unità rispetto alla superficie di un impianto definisce il livello di congestione dell'impianto, quindi l'area che un'apparecchiatura occupa all'interno dello stabilimento [1]. Altri parametri sui quali si basa il metodo SW&HI sono la quantità di sostanza pericolosa contenuta nell'apparecchiatura analizzata, tramite la quale si calcolano i valori dei fattori energetici  $F1$ , equazione (2.9), e  $F4$  anch'essi necessari per valutare correttamente l'*Hazard Potential* [1].

$$F4 = M * Hrxn/K \quad (2.12)$$

L'effetto di infiammabilità (NF) e di reazione (NR) si quantifica utilizzando il diagramma dei fuochi della sostanza analizzata (**Figura 2.3** tratta da NFPA 704 [10] con modifiche).



**Figura 2.3:** Diamante dei fuochi generico

Il diamante dei fuochi è un rombo suddiviso in 4 quadrati che forniscono delle informazioni relative alle caratteristiche di una sostanza [11]:

- letalità (health number, NH), legata alla tossicità della sostanza pericolosa ed è identificata con il quadratino blu;
- instabilità chimica (reactivity number, NR), rappresenta la facilità con la quale una sostanza sviluppa una reazione ed è indicata nel quadratino giallo;
- infiammabilità (flammability number, NF), indica la tendenza di una sostanza ad accendersi ed è riportata nel quadratino rosso;
- specialità, (special number, NS) è indicata solamente per alcuni tipi di sostanze aventi particolari caratteristiche, come corrosività, acidità, eccetera, e viene indicato con il corrispondente pittogramma.

Nei quadratini blu, giallo e rosso è presente un numero compreso tra 0 e 4 (con indicazione crescente di pericolo), in base alle caratteristiche della sostanza analizzata [11]. Per la collocazione dell'azienda sul territorio si valuta la frequenza storica con la quale si verificano i disastri naturali, come alluvioni, terremoti ed uragani, (effetto fattori esterni), e la vulnerabilità dell'area a livello sociale [1]. Si considerano anche:

- la natura delle reazioni chimiche che si sviluppano all'interno dell'azienda;

- le possibili reazioni indesiderate che esse possono generare;
- lo stato fisico nel quale si trova una sostanza.

Per esempio, se in un'apparecchiatura il rilascio avvenisse durante un'operazione fisica, come il trasferimento di calore o di materia, allora tale apparecchiatura sarebbe da analizzare come unità di trasformazione fisica (**Tabella 2.1.**). In questa situazione, per determinare la penalità  $pn1$  è necessario che siano note sia le condizioni operative dell'apparecchiatura sia le caratteristiche chimiche della sostanza rilasciata [1] (**Tabella 2.2.**):

- se  $FIP < PT < FiT \rightarrow pn1 = 1,45$ ;
- se  $FiT < PT < 0,75 * TAI \rightarrow pn1 = 1,95$ ;
- se non si rientra nelle condizioni precedentemente descritte  $\rightarrow pn1 = 1,1$ .

Nell'equazione dell'*Hazard Potential* (**Tabella 2.3.**), la penalità  $pn1$  è sempre moltiplicata per il fattore energetico  $F1$ , il quale dipende linearmente dal calore di combustione della sostanza considerata, equazione (2.9).

La penalità  $pn2$  e il fattore  $F$  sono in funzione della pressione di esercizio (PP) e della tensione di vapore (VP) della sostanza rilasciata [1] (**Tabella 2.2.**):

- se  $AP < VP < PP \rightarrow pn2 = fp1$  e  $F = F2 + F3$ ;
- se  $PP \leq AP < VP \rightarrow pn2 = fp2$  e  $F = F2$ ;
- se  $VP < AP < PP$  (apparecchiatura che lavora in sovrappressione)  $\rightarrow pn2 = fp3$  e  $F = F3$ ;
- se non si verifica nessuno dei precedenti casi  $\rightarrow pn2 = 1,1$  e  $F = F3$ .

$$fp1 = 1 + \frac{PP-VP}{PP} * 0,6 \quad (2.13)$$

$$fp2 = 1 + \frac{PP-VP}{PP} * 0,4 \quad (2.14)$$

$$fp3 = 1 + \frac{PP-VP}{PP} * 0,2 \quad (2.15)$$

Se un processo si svolge a pressione inferiore di quella atmosferica, allora la penalità  $pn2$  assume un valore compreso tra 1,2 e 1,65 in base al valore del livello del vuoto (da 1 atm a 0,001 atm) [1]. Quindi, nel caso in cui un'apparecchiatura lavorasse a pressione atmosferica (1 atm)  $pn2$  risulterebbe pari a 1,2, se invece lavorasse in sottovuoto molto spinto (0,001 atm)  $pn2$  sarebbe uguale a 1,65. Dato che il metodo SW&HI fornisce i valori della  $pn2$  solamente per gli estremi dell'intervallo indicato, per determinare i valori della penalità  $pn2$  nei singoli casi di vuoto, si è ricorso al metodo della bisezione (**Tabella 2.6.**):

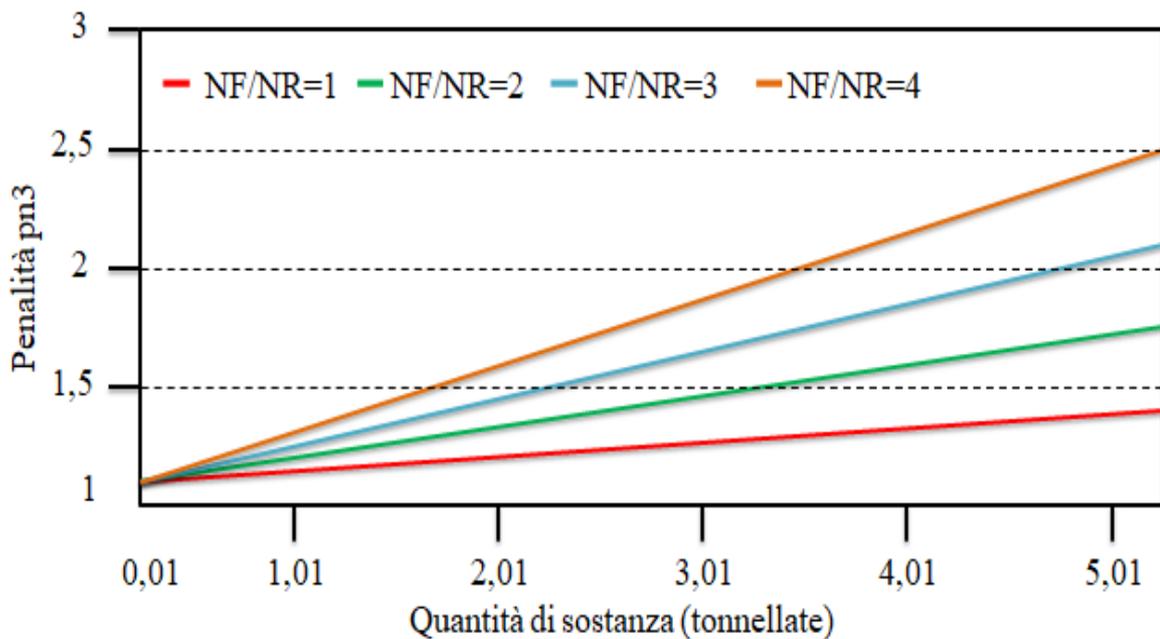
- a) si divide l'intero intervallo in due parti uguali;
- b) si valuta il valore che  $pn2$  assumerebbe nel punto medio dell'intervallo stesso;
- c) si ripete tale procedimento fino al raggiungimento del valore di vuoto al quale lavora l'apparecchiatura considerata.

**Tabella 2.6.** Metodo delle bisezioni utilizzato per valutare la penalità  $pn2$  in base al grado di vuoto di un'apparecchiatura che lavora in sottovuoto.

a) $p = 1 \text{ atm}$	a) $pn2 = 1,2$
c) $p = (1+0,5)/2 = 0,75 \text{ atm}$	c) $pn2 = (1,2+1,43)/2 = 1,312 = 1,31$
a) $p = (1+0,001)/2 = 0,5005 = 0,5 \text{ atm}$	b) $pn2 = (1,2+1,65)/2 = 1,423 = 1,43$
c) $p = (0,5+0,001)/2 = 0,25075 = 0,25 \text{ atm}$	c) $pn2 = (1,43+1,65)/2 = 1,538 = 1,54$
a) $p = 0,001 \text{ atm}$	a) $pn2 = 1,65$

Applicando tale ragionamento, è stato possibile creare una corrispondenza tra grado di vuoto e valore della penalità  $pn2$ .

La penalità  $pn3$  dipende dal quantitativo di sostanza pericolosa contenuta nell'apparecchiatura e per determinarne il valore è necessario consultare un apposito grafico (**Figura 2.4** tratta da [1] con modifiche).



**Figura 2.4:** Andamento della penalità  $pn3$  in funzione del quantitativo di sostanza pericolosa presente all'interno dell'apparecchiatura analizzata

Per determinare NF e NR si fa ricorso al diamante dei fuochi (**Figura 2.3**). Se la sostanza pericolosa considerata non è associata ad un diamante dei fuochi o se non si possono ottenere informazioni complete è possibile consultare delle linee guida per riuscire a quantificare i valori di NH, di NF e di NR (**Tabella 2.7.**, **Tabella 2.8.** e **Tabella 2.9**) [10][11].

**Tabella 2.7.** Significato dei valori numerici assunti da NH.

NH	0	Nessun pericolo al di là degli ordinari combustibili
NH	1	È probabile solo una lesione residua poco importante
NH	2	È necessaria una pronta assistenza medica per evitare un'incapacità temporanea
NH	3	Materiale causante serie lesioni temporali o residue
NH	4	Basse esposizioni causano la morte o importanti lesioni

**Tabella 2.8.** Significato dei valori numerici assunti da NF

NF	0	Non combustibile
NF	1	Flash point > 200 °F = 93 °C
NF	2	Flash point > 100 °F = 38 °C
NF	3	Flash point < 100 °F = 38 °C e temperatura di evaporazione > 100 °F = 38°C in condizioni standard di temperatura e pressione (STP)
NF	4	Flash point < 73 °F = 23 °C e temperatura di evaporazione < 100 °F = 38°C in condizioni standard di temperatura e pressione (STP)

**Tabella 2.9.** Significato dei valori numerici assunti da NR

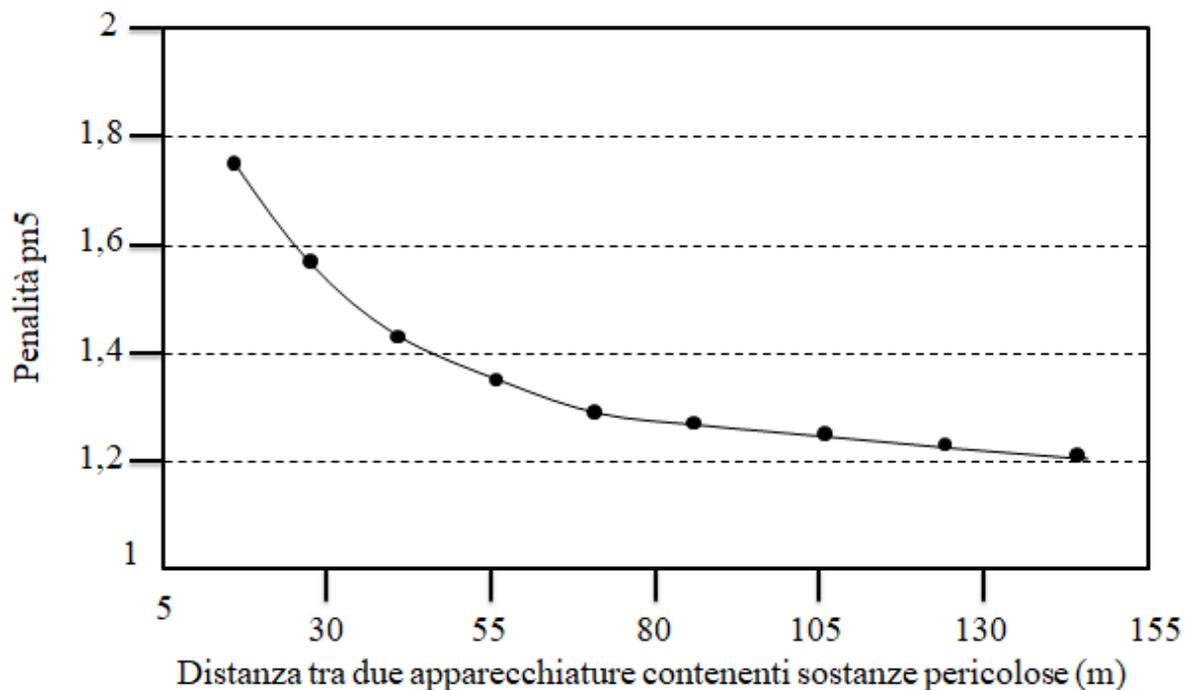
NR	0	La sostanza è completamente stabile, anche quando è riscaldata in caso di incendio
NR	1	Blandamente reattiva al riscaldamento e/o alla pressione, oppure instabile ad elevate temperature e pressioni
NR	2	Reattività significativa, anche senza il riscaldamento o la pressione, oppure trasformazione chimica violenta ad alta temperatura e pressione
NR	3	Possibile detonazione, decomposizione e/o reazione esplosiva ma è necessaria una consistente sorgente di energia
NR	4	Possibile detonazione, decomposizione e/o reazione esplosiva

Nel caso in cui NR fosse pari a 0, quindi il rapporto tra NF e NR pari a infinito, allora si è considerato NR uguale a 1, valore della categoria peggiore successiva.

La penalità  $pn4$  è correlata alle caratteristiche chimiche della sostanza pericolosa considerata [1]:

$$pn4 = \text{Max} [1, 0,30 * (NF + NR)] \quad (2.16)$$

La penalità  $pn5$  è in funzione della distanza tra due apparecchiature contenenti delle sostanze pericolose (**Figura 2.5** tratta da [1] con modifiche).



**Figura 2.5:** Andamento della penalità pn5 in funzione della distanza tra due apparecchiature contenenti sostanze pericolose.

La penalità  $pn6$  rappresenta la densità delle unità contenenti sostanze pericolose in una determinata area e viene valutata nel seguente modo [1]:

$$pn6 = (1 + \% \text{ dello spazio occupato da un'apparecchiatura in un'area avente un raggio pari a 30 metri}/100) \quad (2.17)$$

La penalità  $pn7$  viene quantificata in base alla frequenza delle catastrofi naturali, come terremoti e uragani [1]: è pari a 2 se si verificano 1 volta all'anno; è uguale a 1,5 o 1,1 se si verificano 1 volta ogni 5 o 20 anni, rispettivamente. Infine, la penalità  $pn8$  fa riferimento alla frequenza di sommosse popolari e la si considera pari a 2 se sono frequenti o pari a 1,1 se in frequenti [1].

Oltre agli effetti appena analizzati che costituiscono le penalità del metodo SW&HI, nel 2017 è stata proposta una modifica del metodo aggiungendo altre tre penalità [12]:

- $pn_{gr}$ , si inserisce nel metodo se la sostanza che si analizza è una polvere combustibile ed è in funzione della granulometria della polvere stessa (per polveri grossolane la penalità è pari ad 1, per polveri fini la penalità tende a 2);
- $pn_{ox}$ , viene inserita nel metodo se la sostanza in esame ha proprietà ossidanti;
- $pn_{exp}$ , viene inserita nel metodo se la sostanza in esame ha proprietà detonanti.

Queste tre penalità sono state inserite all'interno del metodo come fattori moltiplicativi nell'algoritmo dell'*Hazard Potential* [12].

## 2.2 Calcolo del parametro B2

Il parametro B2 [1] è indipendente dalla fase in cui si sviluppa un'eventuale nube di sostanza pericolosa:

$$B2 = a * (G * pnr1 * pnr2 * pnr3 * pnr4 * pnr5 * pn6 * pn7)^b \quad (2.18)$$

Dove:

- *a* è una costante pari a 23,35;
- *G* raggruppa un insieme di eventi che generano la formazione di un'atmosfera tossica e viene calcolato come prodotto tra la massa di sostanza dispersa durante il rilascio (*m*) e il parametro *S*, che dipende dalle condizioni del rilascio;
- *pnr1* rappresenta l'effetto della temperatura (confronta la temperatura di processo con la temperatura ambiente e con la temperatura di autoaccensione e di flash point della sostanza pericolosa);
- *pnr2* rappresenta l'effetto della pressione (confronta la pressione di processo con la tensione di vapore della sostanza considerata e con la pressione atmosferica);
- *pnr3* dipende dalla densità di vapore della sostanza rapportata alla densità dell'aria (i gas o i vapori pesanti si disperdono in un tempo maggiore rispetto ai gas e ai vapori leggeri);
- *pnr4* è legato all'effetto che la sostanza tossica dispersa ha sulla salute umana;
- *pnr5* indica la densità di popolazione presente nell'area circostante alla dispersione;
- *pn6* è correlato alla frequenza con la quale si verificano le catastrofi naturali, come terremoti e uragani;
- *pn7* è in funzione alla frequenza con la quale si verificano sommosse sociali;
- *b* è una costante pari a 0,425.

Una nube di sostanza tossica si può formare in seguito ad uno sversamento di un liquido infiammabile o di un gas tossico direttamente in atmosfera, oppure a causa di una liquefazione di un gas tossico o di una dispersione di un solido piroforico [1]. Il rilascio di un gas tossico direttamente in atmosfera, in un luogo chiuso o in assenza di vento, genera un suo accumulo che determina un'atmosfera tossica e letale. La liquefazione di un gas può produrre la formazione di un sistema bifasico, per cui la sostanza tossica è dispersa in ambiente sia sottoforma di vapore sia di liquido. Infine, un solido piroforico potrebbe generare dei vapori tossici che, dispersi nell'aria, generano un'atmosfera tossica [1].

## 2.3 Calcolo del parametro A

Il parametro *A* [1] può variare sia da un reparto dell'azienda all'altro sia tra le varie apparecchiature presenti in uno stesso reparto:

$$A = 0,15 * (1 + cr1) * (1 + cr2) * (1 + cr3) * (1 + cr4) * (1 + cr5) * (1 + cr6) * (1 + cr7) * (1 + cr8) \quad (2.19)$$

Ogni credito è suddiviso in sottocrediti: per esempio, il credito 1 (*cr1*) è suddiviso in 5 sottocrediti (*cr1<sub>1</sub>*, *cr1<sub>2</sub>*, *cr1<sub>3</sub>*, *cr1<sub>4</sub>*, *cr1<sub>5</sub>*) e il valore complessivo di *cr1* è calcolato

tramite una sommatoria dei  $cr1_i$ . Ogni credito è associata una misura di sicurezza (**Tabella 2.10.**) e assume uno specifico valore a seconda del livello di protezione fornito delle misure effettive presenti nel reparto [1].

**Tabella 2.10.** Significato dei crediti e dei sottocrediti che costituiscono il metodo SW&HI.

<b>Crediti</b>	<b>Significato</b>
cr1 tot	Piano di emergenza
cr1-1	quanto il piano di emergenza considera/consulta le industrie circostanti e la società
cr1-2	modalità di comunicazione dell'emergenza
cr1-3	consapevolezza di ogni persona delle proprie responsabilità e delle misure di prevenzione da adottare in caso di emergenza
cr1-4	presenza di strutture mediche nelle vicinanze
cr1-5	frequenza delle prove di emergenza
cr2 tot	Effetto del piano di gestione delle emergenze
cr2-1	numero di lavoratori e di abitanti nei circondari coinvolti nell'emergenza
cr2-2	presenza adeguata delle attrezzature per contrastare gli incendi
cr2-3	presenza di personale tecnico adeguatamente formato
cr2-4	frequenza esercitazioni anti incendio
cr2-5	visibilità del piano di gestione delle emergenze in tutti i luoghi dell'azienda
cr2-6	coinvolgimento delle persone esterne nel piano di gestione delle emergenze
cr3 tot	Altre misure di controllo dei danni
cr3-1	presenza di sistemi di diluizione
cr3-2-1	presenza di dispositivi di sicurezza a schiuma
cr3-2-2	presenza di acqua con pompe e linee di tubi separate
cr3-2-3	presenza di estintori in quantità adeguate
cr3-2-4	presenza di dispositivi rompi fiamma
cr3-2-5	presenza di altri dispositivi
cr3-2 tot	
cr3-3	disponibilità di gas inerti e attrezzature per la diluizione di gas esplosivi
cr3-4	presenza di sistemi di copertura ad acqua per ogni infiammabile e per la gestione delle unità esplosive
cr4 tot	Presenza di dispositivi di controllo
cr4-1	di temperatura
cr4-2	di pressione
cr4-3	di livello
cr4-4	di portata
cr4-5	di altri parametri
cr5 tot	Installazione di dispositivi di rilevazione
cr5-1	distanza tra due dispositivi di rilevazione per gestire le sostanze infiammabili
cr5-2	numero di rilevatori di miscele esplosive
cr5-3	collocazione dei rilevatori di sostanze tossiche
cr5-4	collocazione dei dispositivi rompi fiamma

Crediti	Significato
cr6 tot	Presenza di dispositivi di sicurezza
cr6-1	shut down
cr6-2	dispositivi di blocco/interruzione tra le apparecchiature
cr6-3	docce antincendio per spegnere il fuoco
cr6-4	vento o valvole di sicurezza
cr7 tot	Caratteristiche psico-fisiche del personale e livello di automazione
cr7a	livello di automazione (alto, medio, basso)
cr7b-1	senso di responsabilità del personale
cr7b-2	stato fisico (buona salute ...) del personale
cr7b-3	intelligenza del personale
cr7b-4	senso di sicurezza (del lavoro e di altro)
cr8	Probabilità di fallimento di un'apparecchiatura

I crediti che possono variare da un settore all'altro sono:

- *cr2*, che dipende dal numero di persone qualificate che quotidianamente sono presenti nel reparto;
- *cr3*, che è relativo ai dispositivi di sicurezza presenti nel settore;
- *cr5*, che si riferisce all'installazione di dispositivi di rilevazione nel reparto;
- *cr6*, che indica la presenza di dispositivi di sicurezza nel settore.

Il credito *cr4*, presenza di dispositivi di controllo, può variare tra un'apparecchiatura all'altra all'interno di uno stesso reparto.

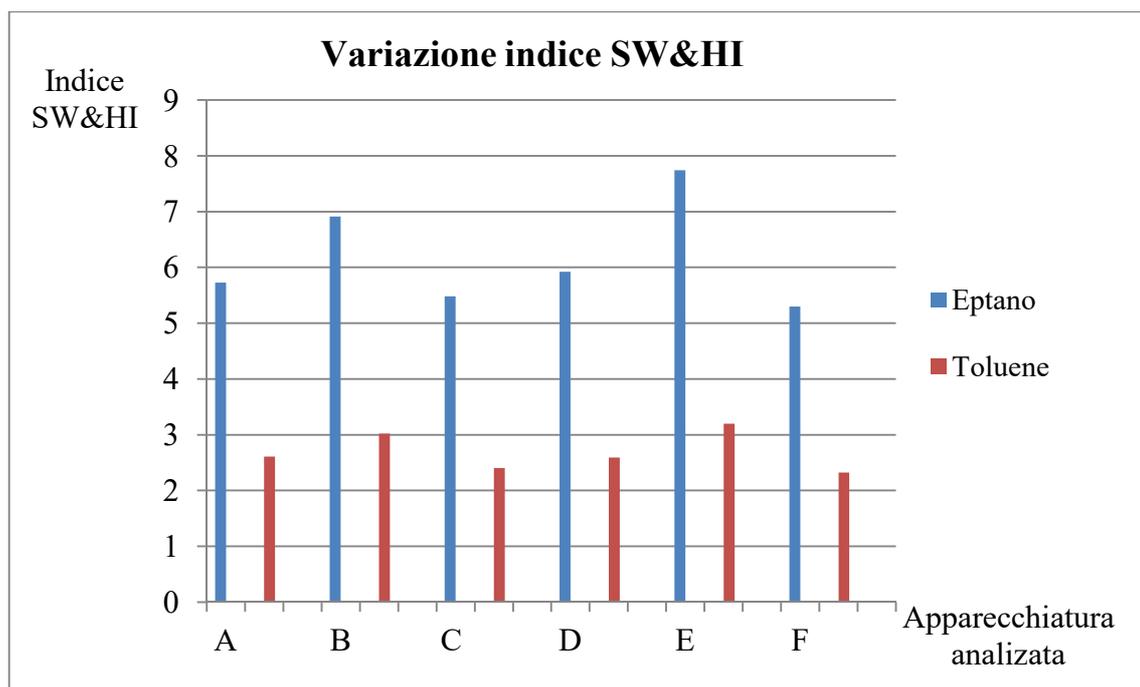
Valutate le penalità ed i crediti, i parametri *B* ed *A* sono calcolabili e si quantifica l'indice SW&HI: si è assunto come rischio accettabile per un'apparecchiatura un valore dell'indice SW&HI minore di 5; se invece l'indice risulta maggiore di 5, si deve effettuare un'analisi più approfondita per determinare sia il motivo per il quale l'apparecchiatura è a rischio, sia i dispositivi di controllo e/o di sicurezza da aggiungere in modo da ridurre il rischio.

### 3. Effetto dei fattori energetici sull'indice SW&HI

#### 3.1 Effetto del fattore energetico $F1$

Il fattore  $F1$  compare sempre in modo esplicito nell'algoritmo dell'*Hazard Potential* (Tabella 2.3.). Esso dipende dalla massa di sostanza pericolosa contenuta nell'apparecchiatura analizzata e dal calore di combustione della sostanza pericolosa stessa (equazione (2.9)). Poiché il calore di combustione può variare notevolmente da una sostanza all'altra, si è valutato come tale parametro influenzi l'indice SW&HI. L'importanza di tale proprietà è facilmente visualizzabile se si analizza un'apparecchiatura che lavora sempre alle medesime condizioni operative, ma con sostanze differenti (Figura 3.1):

- se la sostanza contenuta ha un elevato calore di combustione, come per esempio il n-eptano (circa 44700 kJ/mol), l'indice SW&HI assume un valore elevato (maggiore di 5), rendendo l'apparecchiatura a rischio;
- se la sostanza contenuta ha un basso calore di combustione, come per esempio il toluene (circa 3700 kJ/mol), l'indice SW&HI assume un valore basso (minore di 5) e l'apparecchiatura non risulta a rischio.



**Figura 3.1:** Rappresentazione grafica di come varia l'indice SW&HI in funzione della sostanza contenuta in alcune apparecchiature, analizzate tutte come unità di trasformazione fisica.

### 3.2 Effetto dei fattori energetici $F2$ e $F3$

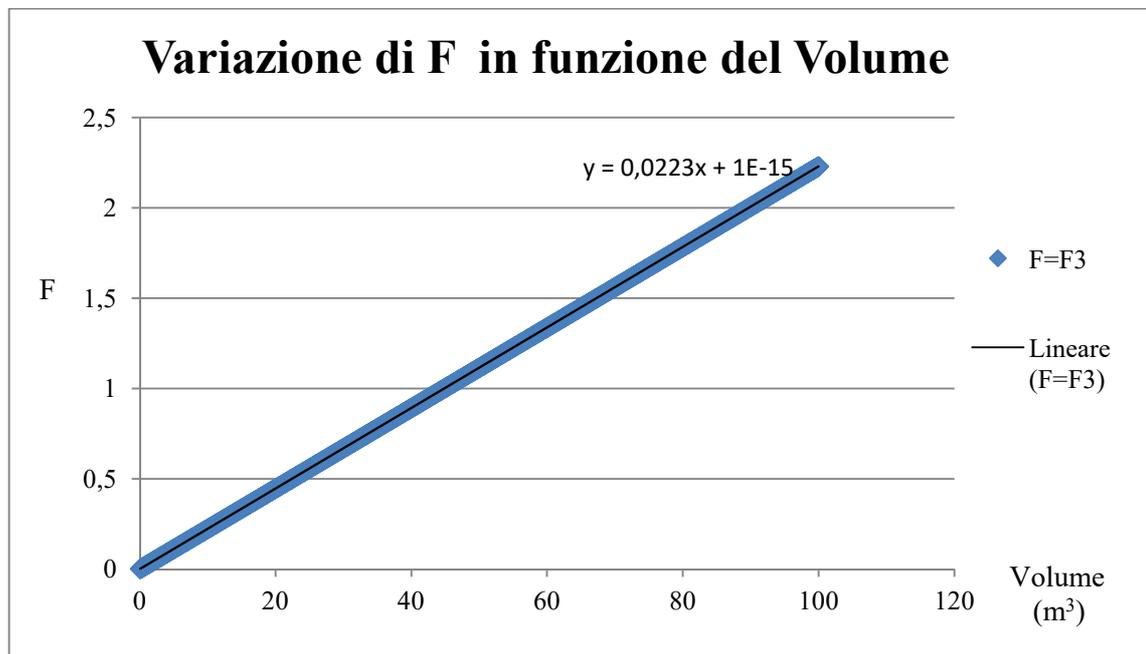
I fattori  $F2$  e  $F3$ , rispettivamente equazioni (2.10) e (2.11), determinano il valore del fattore  $F$ , il quale influenza il valore dell'*Hazard Potential* (Tabella 2.3.). Questi due fattori dipendono:

- dal volume di sostanza pericolosa contenuta all'interno dell'apparecchiatura che si sta analizzando;
- dalla pressione operativa alla quale l'apparecchiatura lavora;
- dalla temperatura di processo.

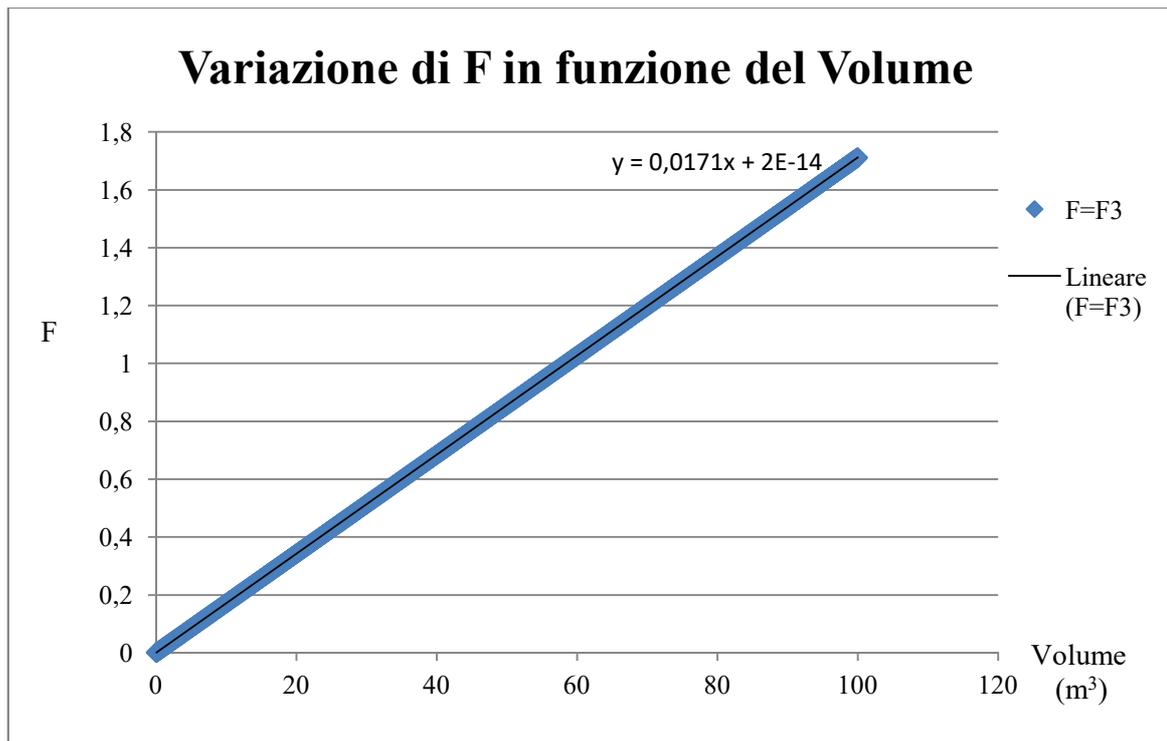
Di seguito, si analizza come la variazione di uno di questi tre parametri incide sui valori del fattore  $F$  e dell'indice SW&HI.

#### 3.2.1 Variazione del volume di sostanza pericolosa nell'apparecchiatura

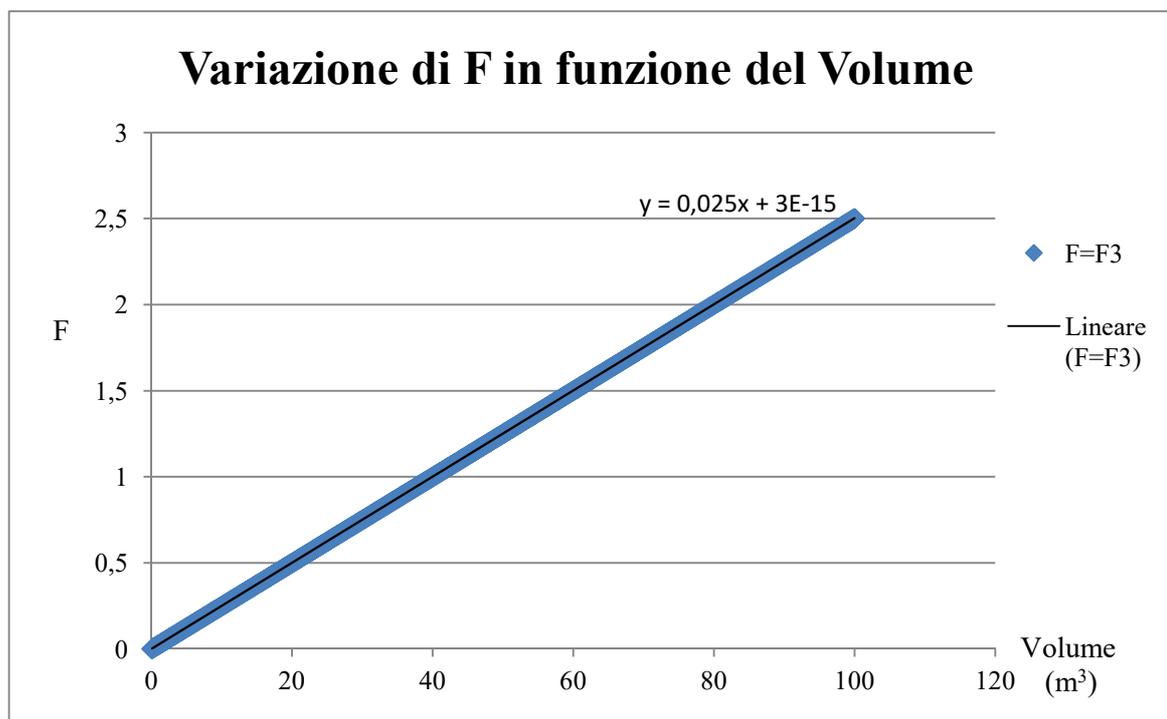
Sia il fattore  $F2$  sia il fattore  $F3$  dipendono linearmente dal volume della sostanza contenuta in un'apparecchiatura, rispettivamente equazioni (2.10) e (2.11). Considerate costanti le condizioni operative di un'apparecchiatura, la tensione di vapore della sostanza e la costante  $K$ , si osserva come il volume della sostanza contenuta in un'apparecchiatura influenzi questi due fattori. Quindi, si seleziona un processo di produzione composto da apparecchiature di diverso tipo, rientranti in diverse unità logiche e contenenti sostanze differenti, in modo che i risultati ottenuti siano i più generici possibili (Figura 3.2.a; Figura 3.2.b; Figura 3.3.a; Figura 3.3.b; Figura 3.4.a; Figura 3.4.b; Figura 3.5.a; Figura 3.5.b).



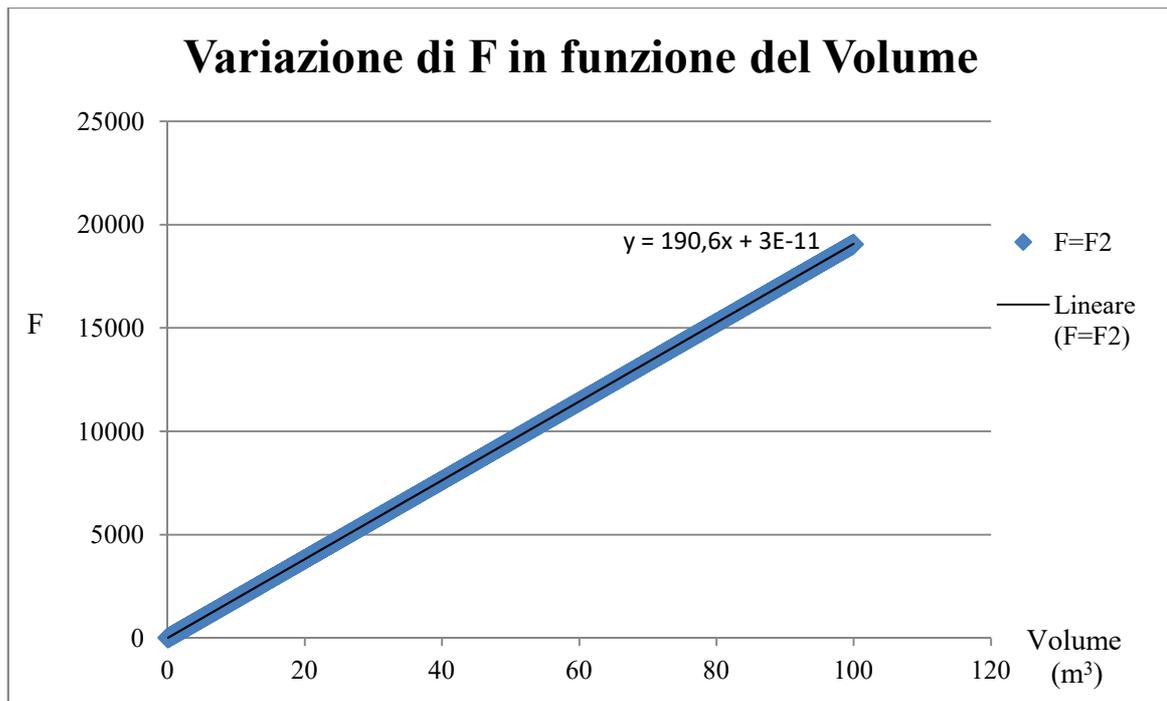
**Figura 3.2.a:** Rappresentazione grafica della dipendenza del parametro  $F$  in funzione del volume, espresso in  $m^3$ , nell'apparecchiatura A analizzata come unità di trasformazione fisica contenente n-eptano.



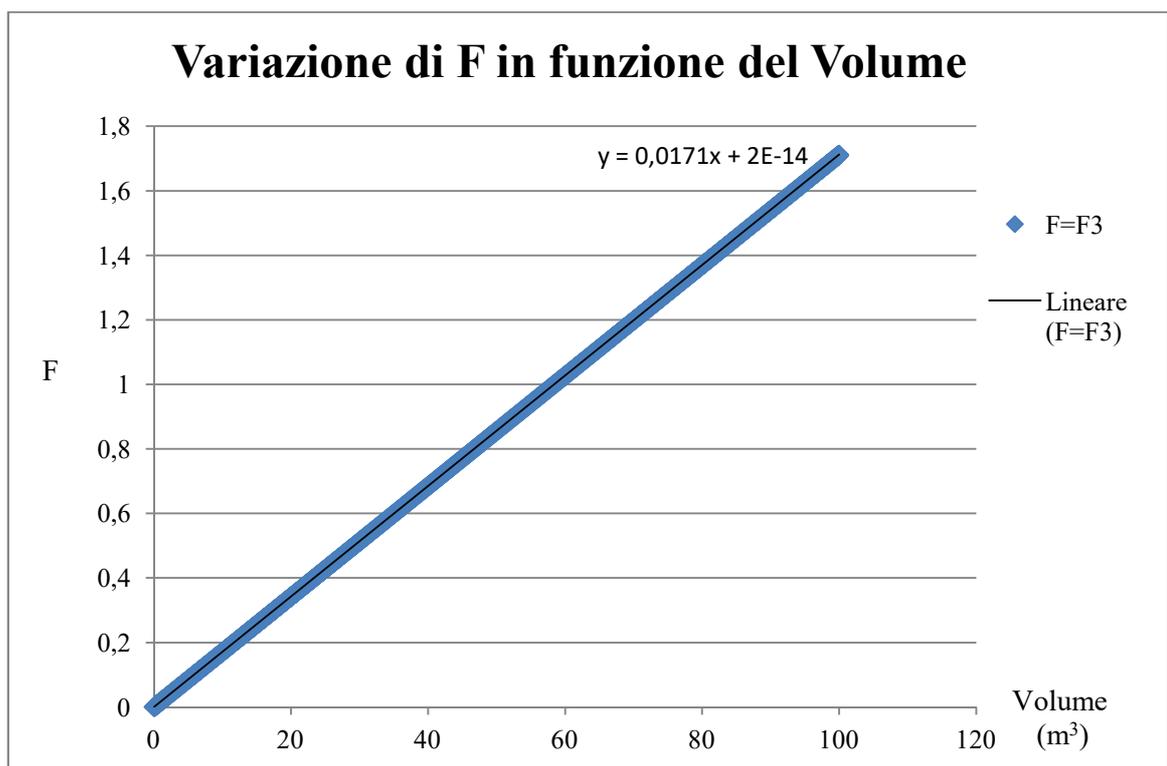
**Figura 3.2.b:** Rappresentazione grafica della dipendenza del parametro  $F$  in funzione del volume, espresso in  $m^3$ , nell'apparecchiatura A analizzata come unità di trasformazione fisica contenente metanolo.



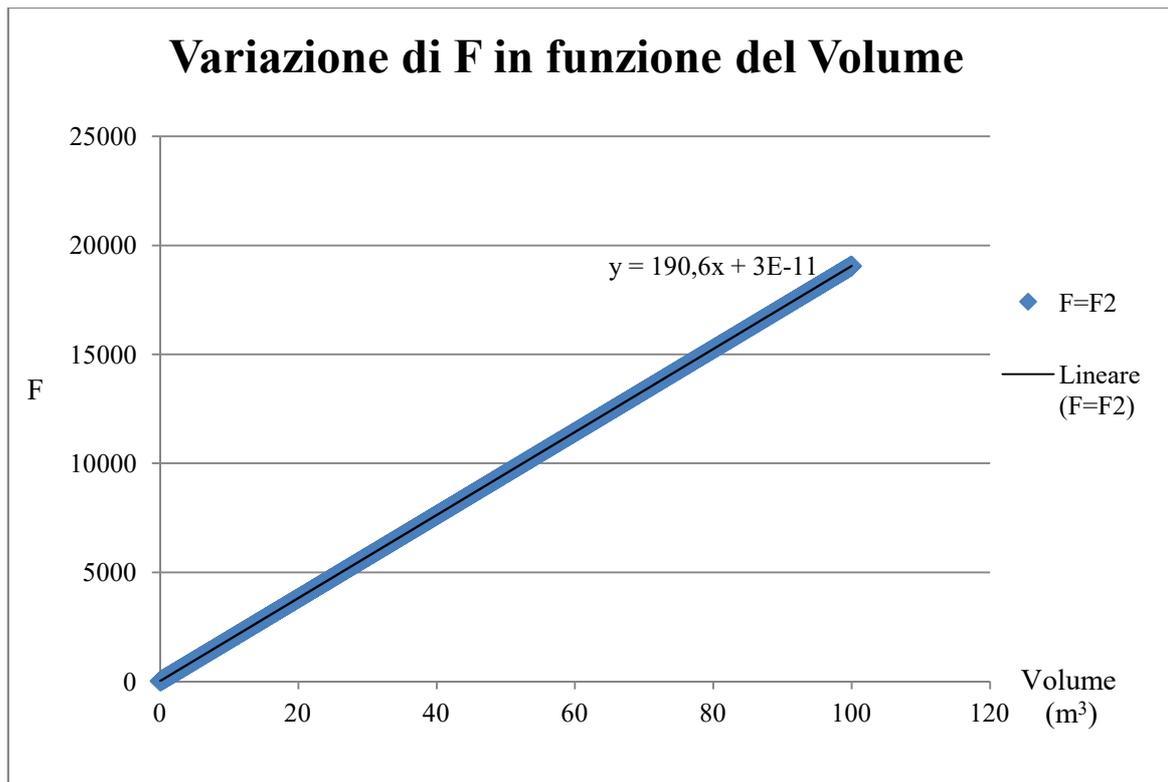
**Figura 3.3.a:** Rappresentazione grafica della dipendenza del parametro  $F$  in funzione del volume, espresso in  $m^3$ , nell'apparecchiatura B analizzata come unità di trasformazione fisica contenente metanolo.



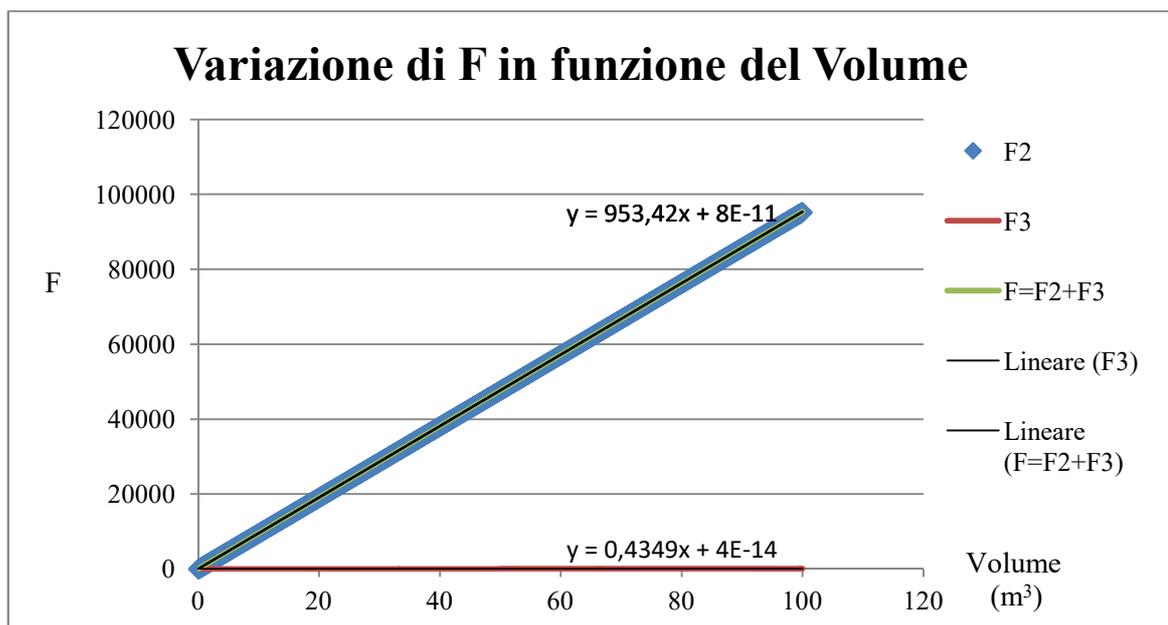
**Figura 3.3.b:** Rappresentazione grafica della dipendenza del parametro  $F$  in funzione del volume, espresso in  $m^3$ , nell'apparecchiatura B analizzata come unità di stoccaggio contenente metanolo.



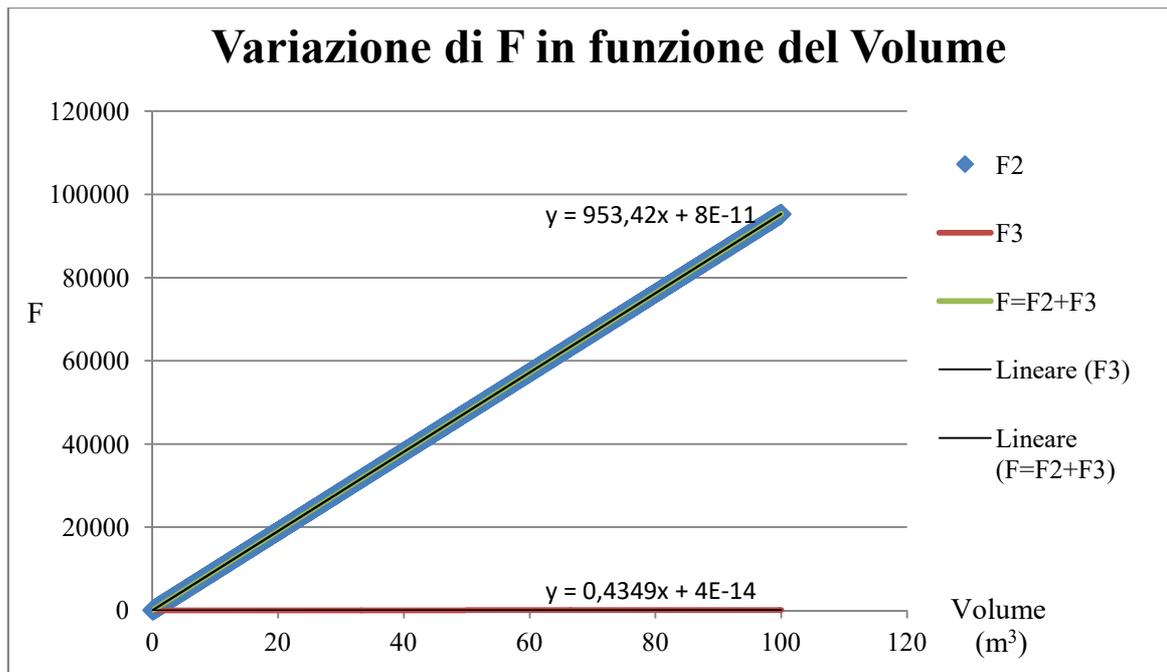
**Figura 3.4.a:** Rappresentazione grafica della dipendenza del parametro  $F$  in funzione del volume, espresso in  $m^3$ , nell'apparecchiatura C analizzata come unità di trasformazione fisica contenente metanolo.



**Figura 3.4.b:** Rappresentazione grafica della dipendenza del parametro  $F$  in funzione del volume, espresso in  $m^3$ , nell'apparecchiatura C analizzata come unità di stoccaggio contenente metanolo.



**Figura 3.5.a:** Rappresentazione grafica della dipendenza del parametro  $F$  in funzione del volume, espresso in  $m^3$ , nell'apparecchiatura D analizzata come unità di trasformazione fisica contenente ossido di etilene.

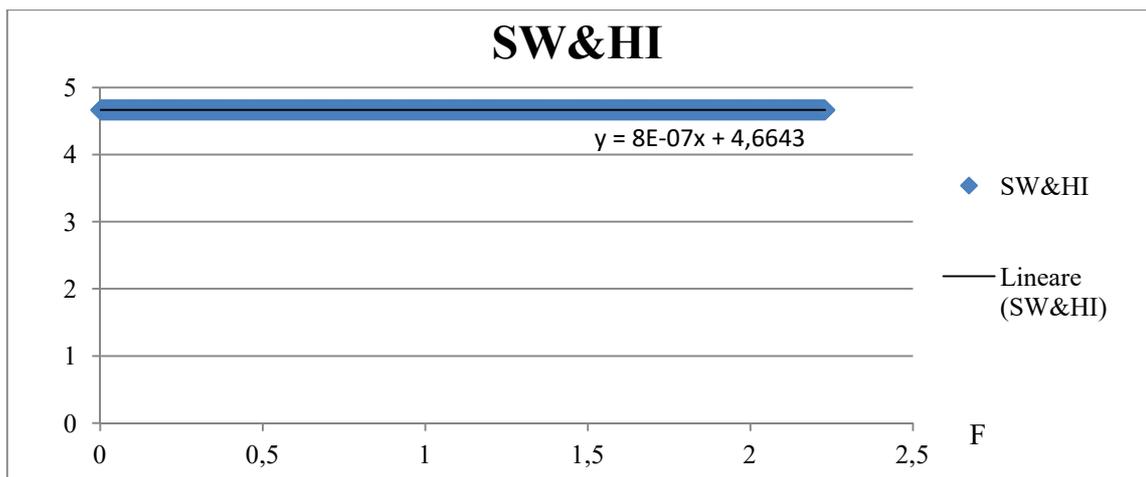


**Figura 3.5.b:** Rappresentazione grafica della dipendenza del parametro  $F$  in funzione del volume, espresso in  $\text{m}^3$ , nell'apparecchiatura D analizzata come unità di stoccaggio contenente ossido di etilene.

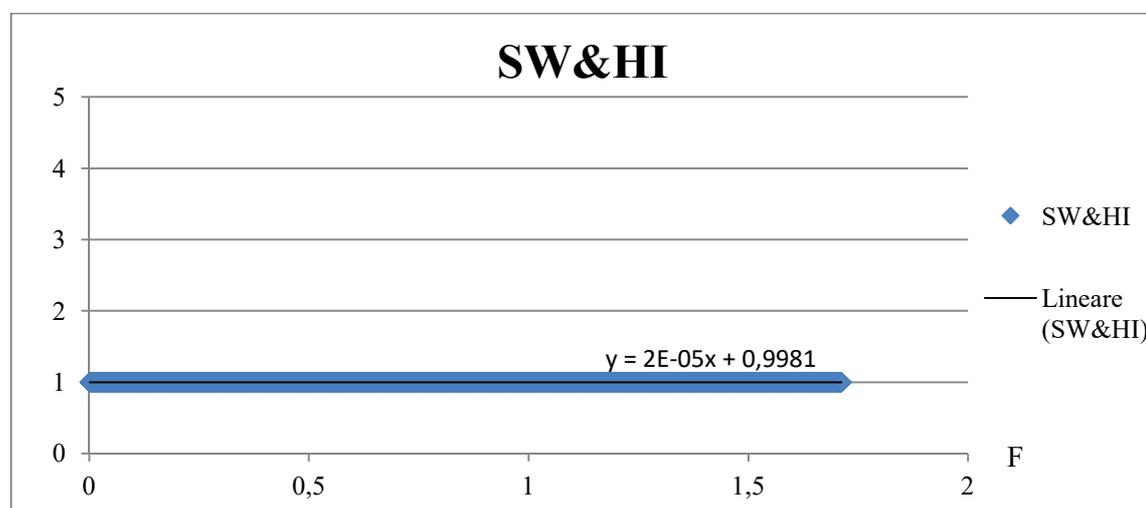
Per tutte le apparecchiature analizzate si è deciso di far variare il volume della sostanza contenuta nell'apparecchiatura da  $0,05 \text{ m}^3$  a  $100 \text{ m}^3$  con un intervallo pari a  $0,05 \text{ m}^3$ , in modo da avere una visione più completa dei risultati. In tutti i casi, un incremento del volume causa l'aumento del fattore  $F$  (dipendenza lineare tra i due parametri), indipendentemente dalla sostanza pericolosa considerata:

- se  $F$  è uguale a  $F3$  (**Figura 3.2.a**, **Figura 3.2.b**, **Figura 3.3.a** e **Figura 3.4.a**), allora una variazione di volume di alcuni ordini di grandezza causa un'apprezzabile variazione del fattore  $F$  (coefficiente angolare delle rette di tendenza è poco maggiore di 0);
- se  $F$  è pari o a  $F2$  (**Figura 3.3.b** e **Figura 3.4.b**) o alla somma dei fattori  $F2$  e  $F3$  (**Figura 3.5.a** e **Figura 3.5.b**), allora una variazione di volume di alcuni ordini di grandezza causa un'analoga variazione del fattore  $F$  (coefficiente angolare delle rette di tendenza nell'ordine delle centinaia per  $F = F2$ , delle migliaia per  $F = F2 + F3$ ).

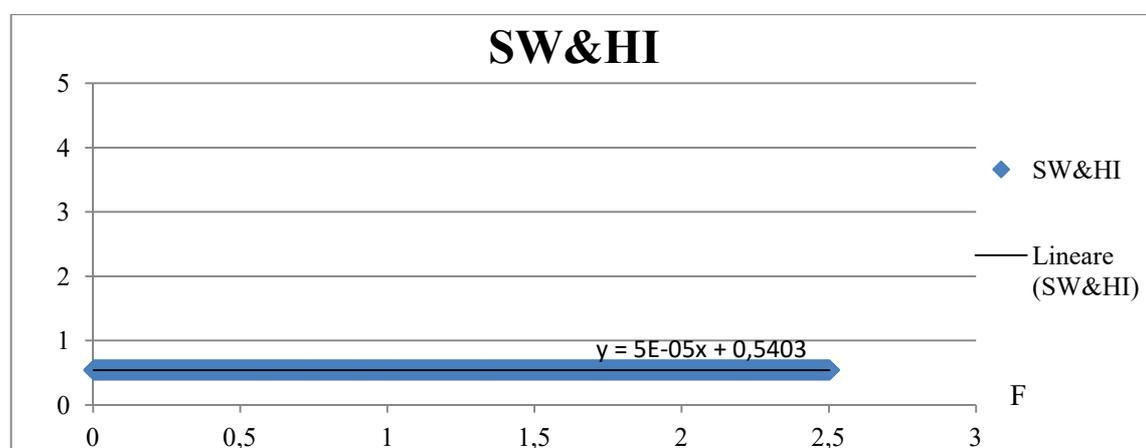
Osservando la **Figura 3.5.a** e la **Figura 3.5.b**, si nota che nel caso in cui il parametro  $F$  risulta pari alla somma dei fattori energetici  $F2$  e  $F3$ , nella pratica lo si può considerare pari a  $F2$ , dato che  $F3$  assume un valore trascurabile rispetto a  $F2$ . Data l'apprezzabile variazione del parametro  $F$ , si è deciso di visualizzare come esso influenzi l'indice SW&HI. Lo studio è stato effettuato considerando le stesse apparecchiature precedentemente analizzate. (**Figura 3.6.a**; **Figura 3.6.b**; **Figura 3.7.a**; **Figura 3.7.b**; **Figura 3.8.a**; **Figura 3.8.b**; **Figura 3.9.a**; **Figura 3.9.b**).



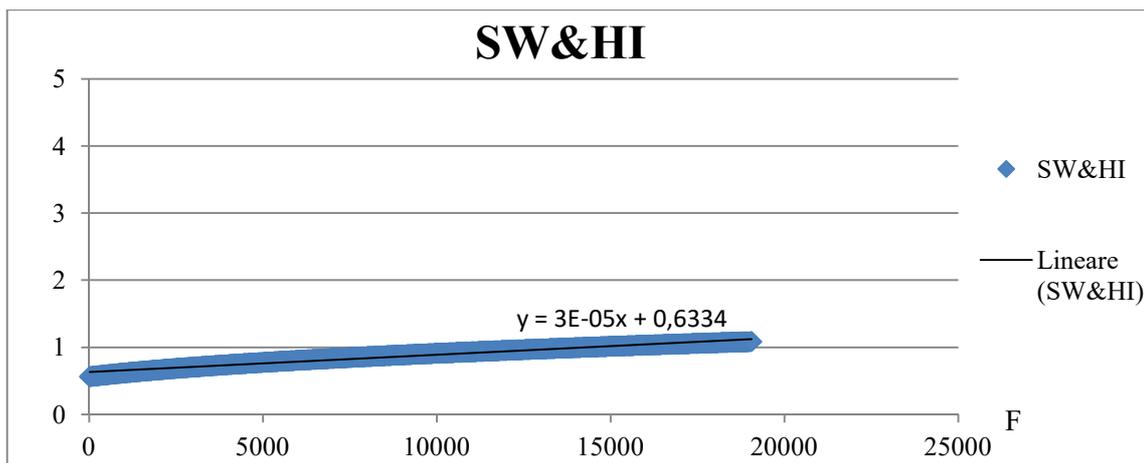
**Figura 3.6.a:** Rappresentazione grafica della dipendenza dell'indice SW&HI in funzione del parametro  $F$ , coincidente con il fattore  $F3$ , nell'apparecchiatura A analizzata come unità di trasformazione fisica contenente n-eptano.



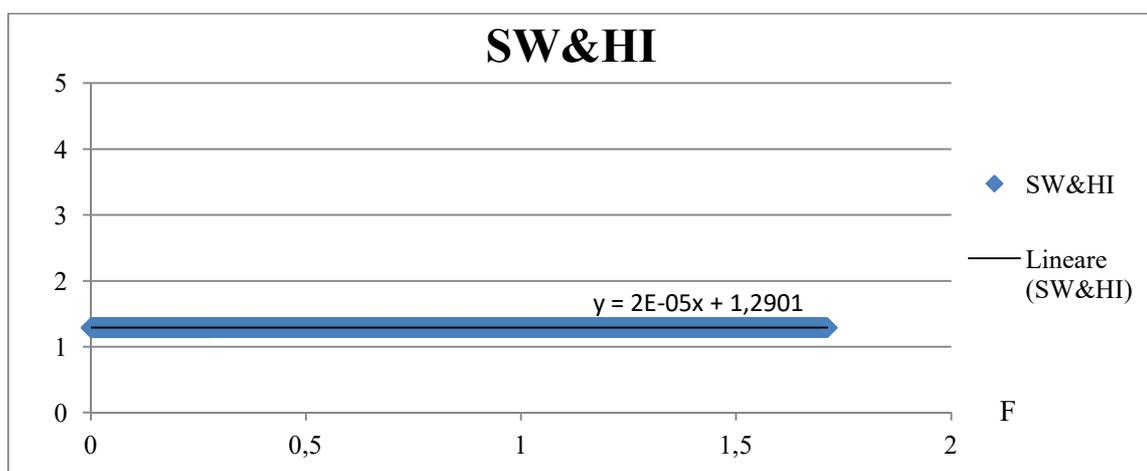
**Figura 3.6.b:** Rappresentazione grafica della dipendenza dell'indice SW&HI in funzione del parametro  $F$ , coincidente con il fattore  $F3$ , nell'apparecchiatura A analizzata come unità di trasformazione fisica contenente metanolo.



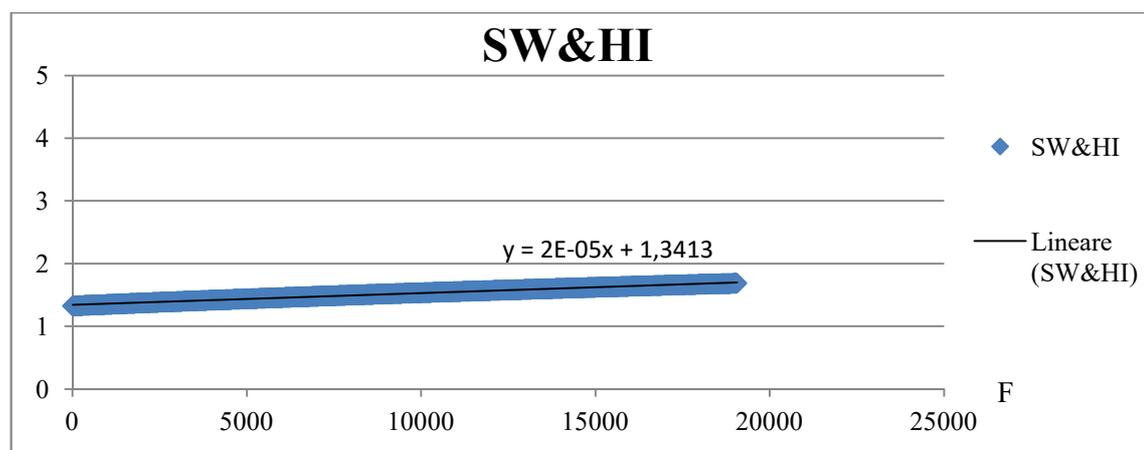
**Figura 3.7.a:** Rappresentazione grafica della dipendenza dell'indice SW&HI in funzione del parametro  $F$ , coincidente con il fattore  $F3$ , nell'apparecchiatura B analizzata come unità di trasformazione fisica contenente metanolo.



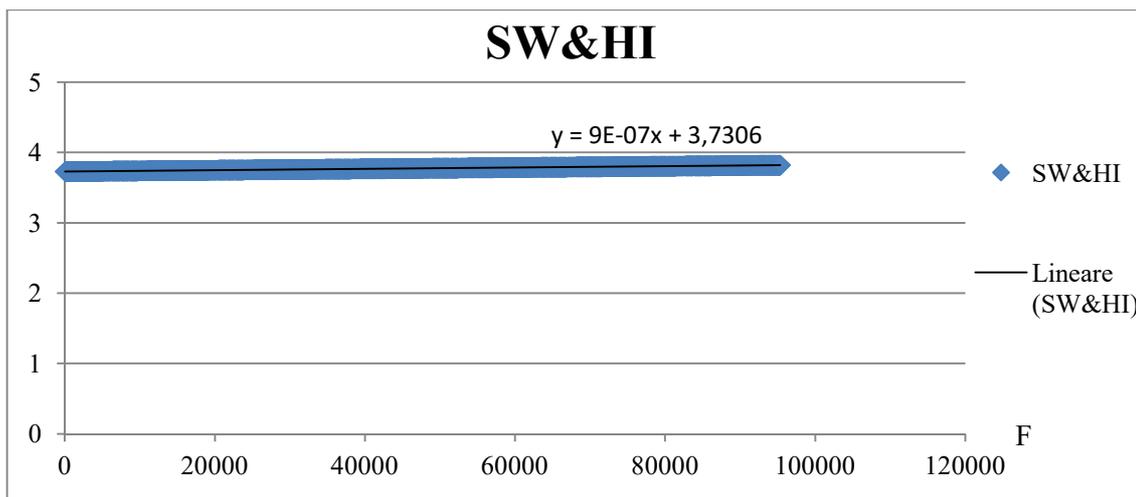
**Figura 3.7.b:** Rappresentazione grafica della dipendenza dell'indice SW&HI in funzione del parametro  $F$ , coincidente con il fattore  $F2$ , nell'apparecchiatura B analizzata come unità di stoccaggio contenente metanolo.



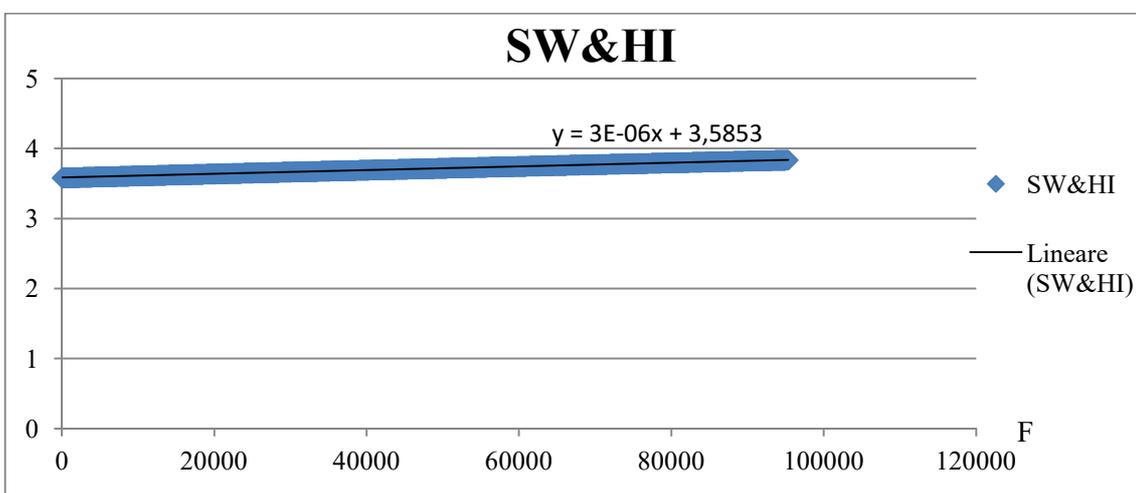
**Figura 3.8.a:** Rappresentazione grafica della dipendenza dell'indice SW&HI in funzione del parametro  $F$ , coincidente con il fattore  $F3$ , nell'apparecchiatura C analizzata come unità di trasformazione fisica contenente metanolo.



**Figura 3.8.b:** Rappresentazione grafica della dipendenza dell'indice SW&HI in funzione del parametro  $F$ , coincidente con il fattore  $F2$ , nell'apparecchiatura C analizzata come unità di stoccaggio contenente metanolo.



**Figura 3.9.a:** Rappresentazione grafica della dipendenza dell'indice SW&HI in funzione del parametro  $F$ , somma dei fattori  $F2$  e  $F3$ , nell'apparecchiatura D analizzata come unità di trasformazione fisica contenente ossido di etilene.



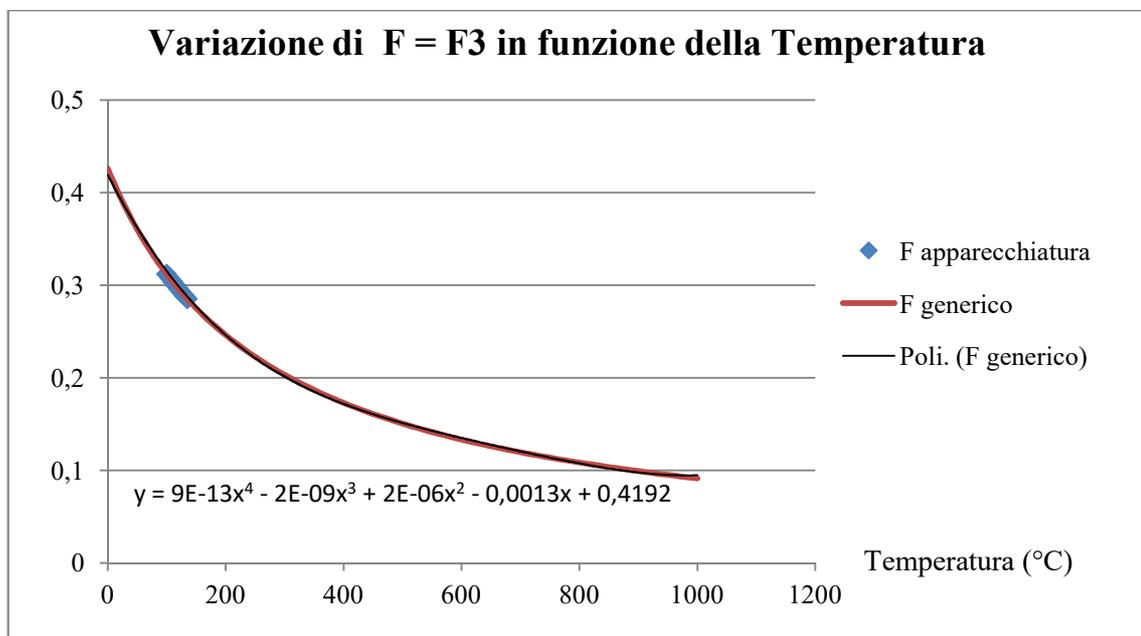
**Figura 3.9.b:** Rappresentazione grafica della dipendenza dell'indice SW&HI in funzione del parametro  $F$ , somma dei fattori  $F2$  e  $F3$ , nell'apparecchiatura D analizzata come unità di stoccaggio contenente ossido di etilene.

Un'apprezzabile variazione del fattore  $F$  causa una leggera variazione dell'indice SW&HI nel caso in cui esso sia pari al fattore energetico  $F2$  o alla somma dei fattori energetici  $F2$  e  $F3$ , dato che  $F3$  risulta trascurabile rispetto a  $F2$ : in entrambi i casi, la variazione dell'indice SW&HI è maggiormente apprezzabile per valori dell'indice inferiori a 1 (l'indice raddoppia rispetto ai valori iniziali). Comunque, anche se in quest'ultima situazione si osserva un maggior aumento dell'indice SW&HI, tale variazione non trasforma un'apparecchiatura "non a rischio" in un'apparecchiatura "a rischio" e, di conseguenza, tale variazione può essere considerata poco importante. Quando il parametro  $F$  viene quantificato pari al fattore energetico  $F3$ , l'indice SW&HI risulta invariato, quindi indipendente da tale parametro. Si può affermare che a fronte di un'apprezzabile variazione del parametro  $F$  dovuta ad una notevole variazione del volume, l'indice SW&HI resta immutato. L'indipendenza dell'indice SW&HI dal volume può essere spiegata osservando la sequenza di passaggi da effettuare per la valutazione dell'indice: per ottenere tale valore si valuta prima il fattore energetico  $F$  in funzione del volume; poi  $F$  viene moltiplicato per la penalità  $pn2$ , nell'apposita formula dell'*Hazard Potential* in

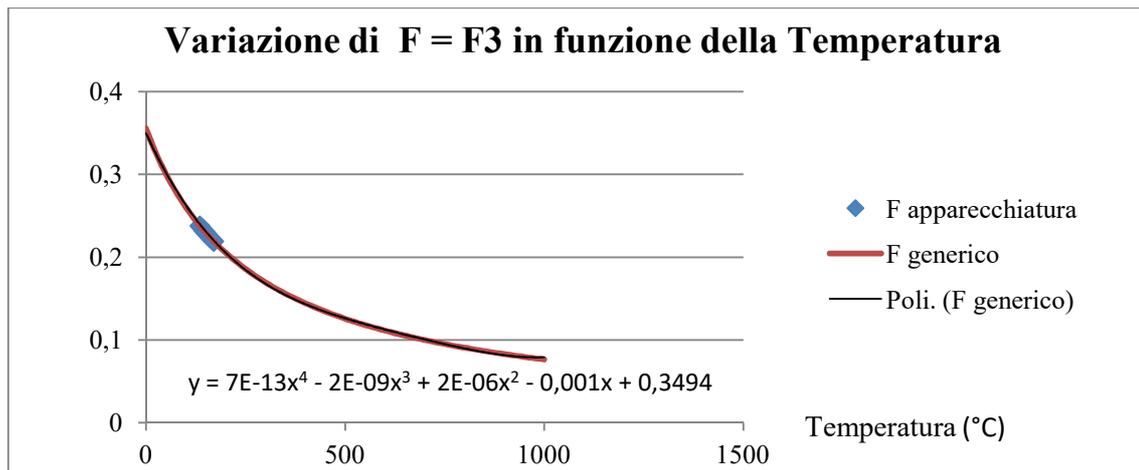
base all'unità logica selezionata; in seguito si determina  $B$  e lo si divide per  $A$ , in modo da calcolare l'indice SW&HI. Dato che un'elevata variazione di volume causa un apprezzabile incremento del parametro  $F$ , ma non genera alcuna variazione dell'indice SW&HI, allora le operazioni che determinano l'*Hazard Potential* (HP) e il parametro  $B$  limitano il contributo del volume.

### 3.2.2 Variazione della temperatura operativa

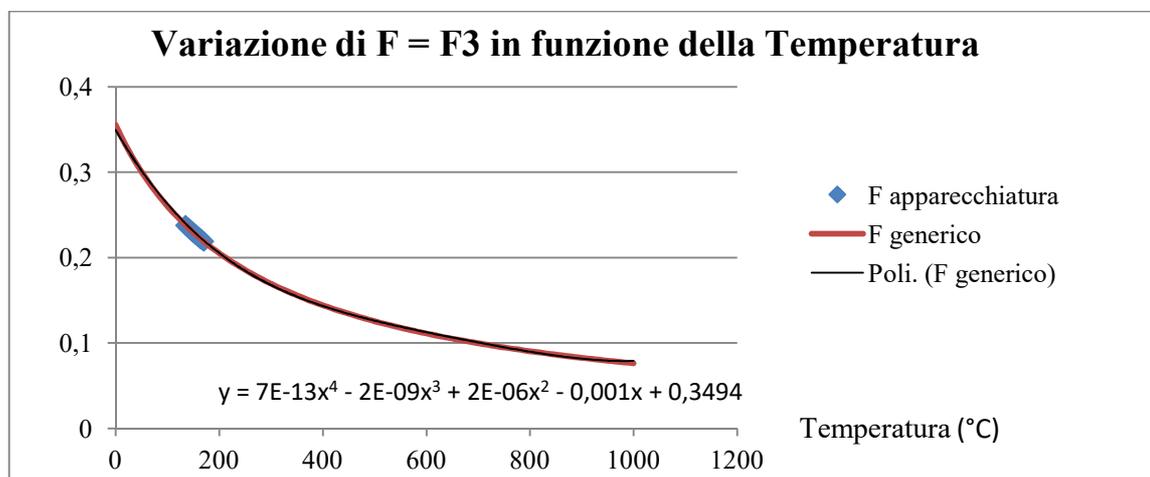
Il fattore  $F2$  non dipende dalla temperatura, equazione (2.10), mentre il fattore  $F3$  è inversamente proporzionale ad essa, equazione (2.11). Si studia come varia il parametro  $F$  in funzione della temperatura per le stesse apparecchiature analizzate per la variazione del volume, ad eccezione di una in quanto essa lavora a temperatura costante. La variazione di temperatura modifica anche il valore della penalità  $pnI$ , la quale compare nell'equazione dell'*Hazard Potential* (Tabella 2.3.) e, di conseguenza, nelle relazioni che quantificano  $B$  e l'indice SW&HI. Di seguito, il volume è un parametro noto e costante, che però può variare da un'apparecchiatura all'altra. Per completezza dello studio, in ogni apparecchiatura analizzata la temperatura varia in due intervalli: uno che coincide con le condizioni operative e identifica il parametro " $F$  apparecchiatura"; l'altro più ampio, varia da 0°C a 1000°C con un intervallo di 10°C, per rappresentare l'andamento del parametro " $F$  generico" (Figura 3.10.a; Figura 3.10.b; Figura 3.11.a; Figura 3.11.b; Figura 3.12.a; Figura 3.12.b). L'intervallo in cui si è deciso di far variare la temperatura e il rispettivo incremento sono stati scelti a piacere: si è assunto un intervallo molto ampio in modo da rappresentare in maniera più estesa l'andamento del fattore " $F$  generico", mentre l'incremento assume un valore molto piccolo in modo da ottenere un andamento continuo di  $F$ .



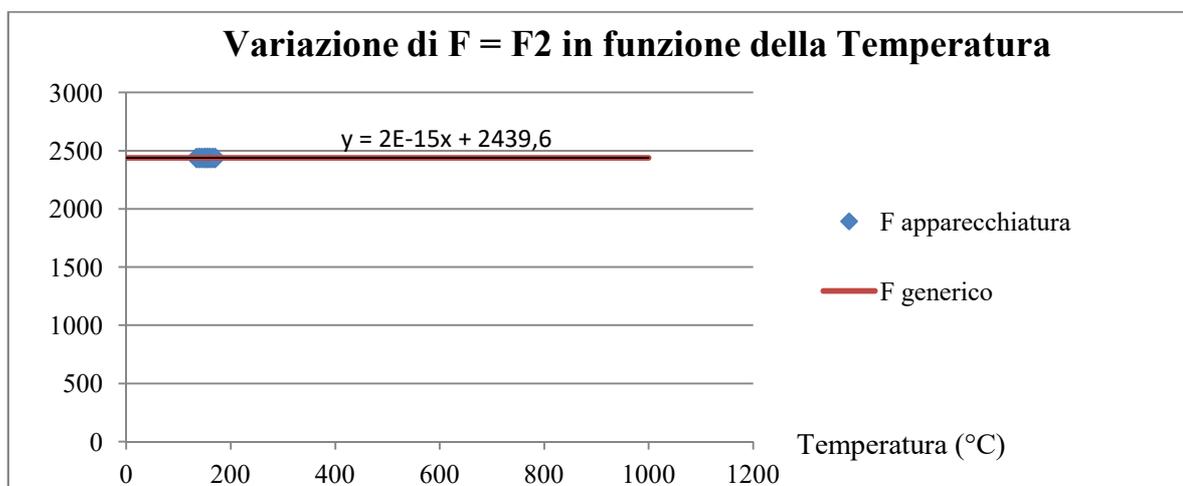
**Figura 3.10.a:** Rappresentazione grafica della dipendenza del parametro  $F$ , coincidente con  $F3$ , in funzione della temperatura di processo (azzurro) e della temperatura generica (rossa) dell'apparecchiatura A, analizzata come unità di trasformazione fisica e contenente n-eptano.



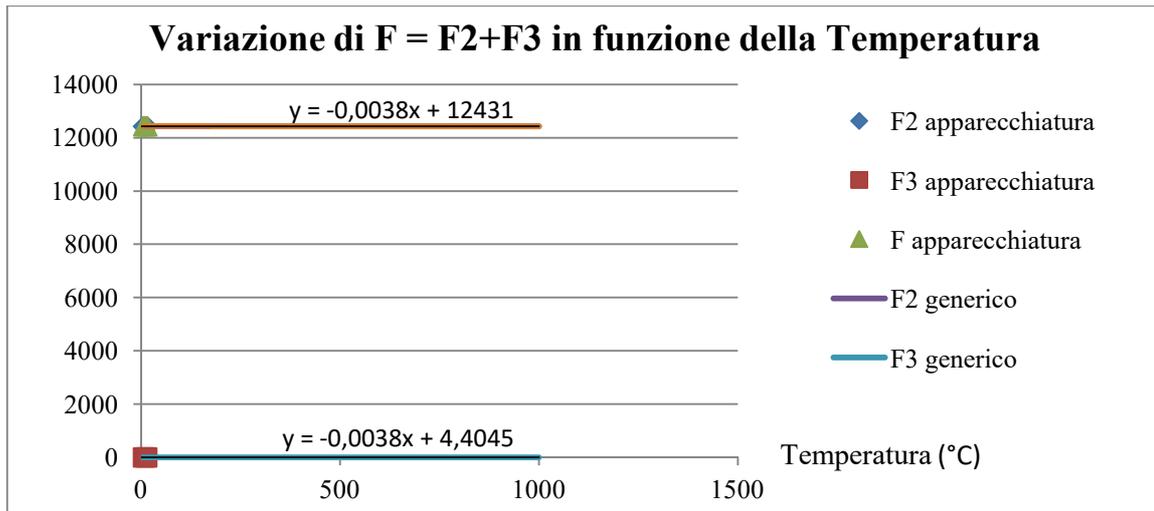
**Figura 3.10.b:** Rappresentazione grafica della dipendenza del parametro  $F$ , coincidente con  $F3$ , in funzione della temperatura di processo (azzurro) e della temperatura generica (rossa) dell'apparecchiatura A, analizzata come unità di trasformazione fisica e contenente metanolo.



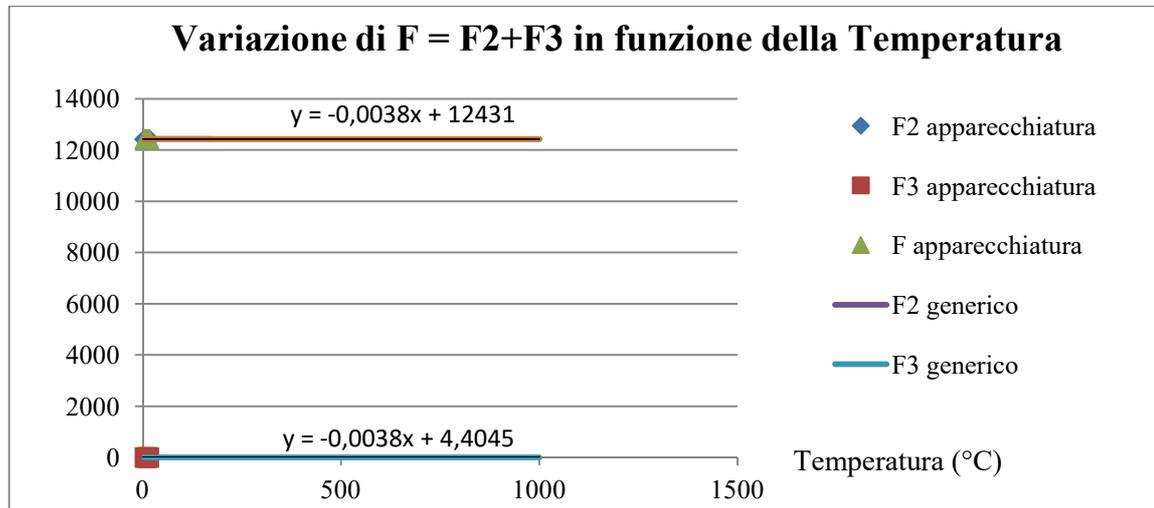
**Figura 3.11.a:** Rappresentazione grafica della dipendenza del parametro  $F$ , coincidente con  $F3$ , in funzione della temperatura di processo (azzurro) e della temperatura generica (rossa) dell'apparecchiatura B, analizzata come unità di trasformazione fisica e contenente metanolo.



**Figura 3.11.b:** Rappresentazione grafica della dipendenza del parametro  $F$ , coincidente con  $F2$ , in funzione della temperatura di processo (azzurro) e della temperatura generica (rossa) dell'apparecchiatura B, analizzata come unità di stoccaggio e contenente metanolo.



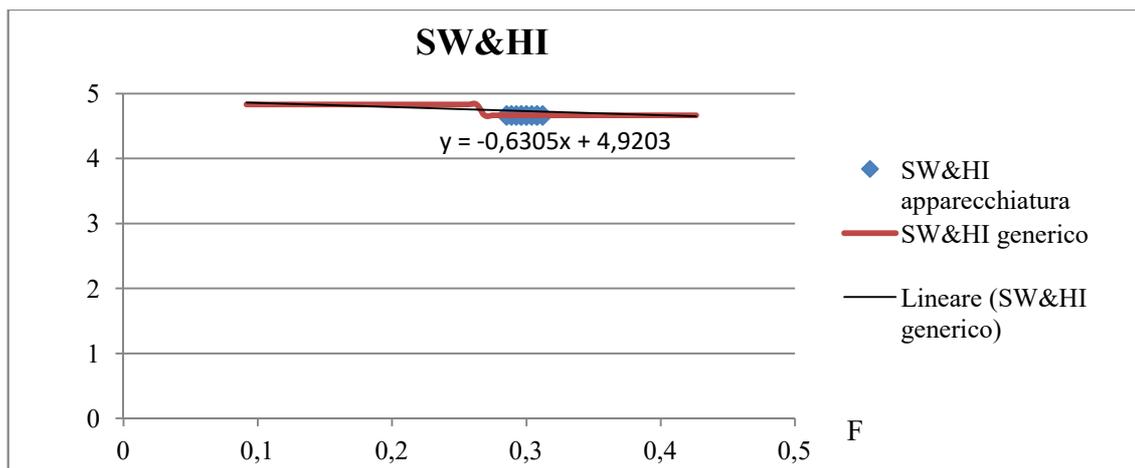
**Figura 3.12.a:** Rappresentazione grafica della dipendenza del parametro  $F$ , coincidente con la somma dei fattori  $F_2$  e  $F_3$ , in funzione della temperatura di processo e della temperatura generica dell'apparecchiatura  $C$ , analizzata come unità di trasformazione fisica e contenente ossido di etilene.



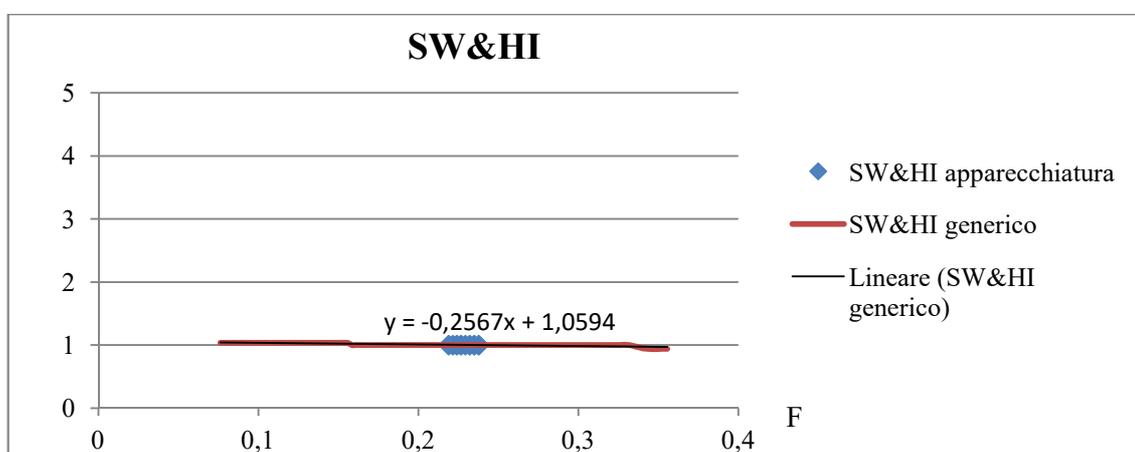
**Figura 3.12.b:** Rappresentazione grafica della dipendenza del parametro  $F$ , coincidente con la somma dei fattori  $F_2$  e  $F_3$ , in funzione della temperatura di processo e della temperatura generica dell'apparecchiatura  $C$ , analizzata come unità di stoccaggio e contenente ossido di etilene.

Incrementando notevolmente la temperatura, il fattore  $F$ , sia quello relativo all'apparecchiatura sia il generico, diminuisce in modo apprezzabile solamente per le apparecchiature in cui coincide con il fattore energetico  $F_3$ , dato che in questo caso  $F$  risulta inversamente proporzionali alla temperatura. Invece, per le apparecchiature in cui il parametro  $F$  equivale al fattore energetico  $F_2$  o alla somma dei fattori energetici  $F_2$  e  $F_3$ , esso rimane costante, essendo  $F_2$  indipendente dalla temperatura. Anche in questo caso, le apparecchiature in cui il parametro  $F$  risulta uguale alla somma dei fattori energetici  $F_2$  e  $F_3$ , nella pratica lo si può considerare pari a  $F_2$ , dato che  $F_3$  è trascurabile rispetto  $F_2$ .

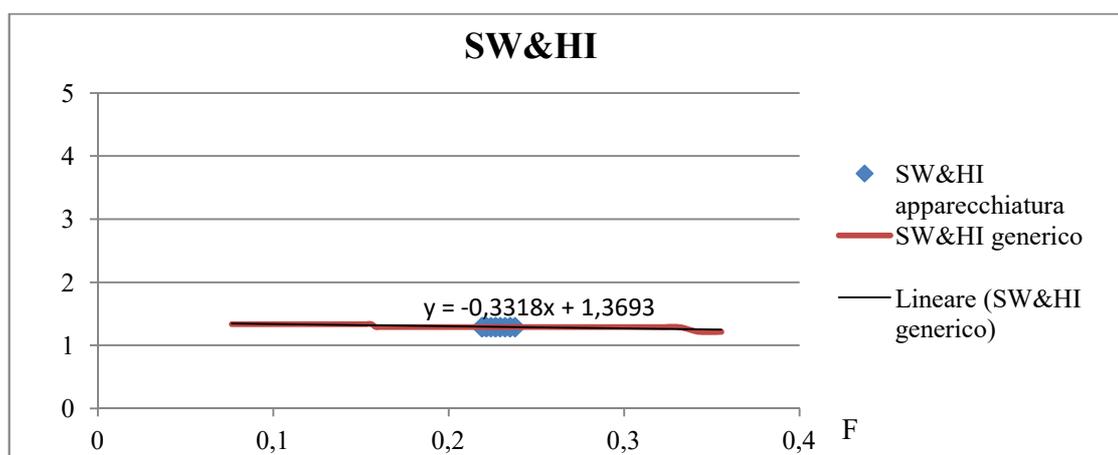
Nei casi in cui i parametri  $F$  siano uguali a  $F_2$  o alla somma di  $F_2$  e  $F_3$ , il contributo della temperatura non modifica tale parametro ma l'indice SW&HI può comunque variare a causa del contributo della penalità  $pnI$ . Quindi, si è visualizzata la variazione dell'indice SW&HI (**Figura 3.13.a; Figura 3.13.b; Figura 3.14.a; Figura 3.14.b; Figura 3.15.a; Figura 3.15.b**).



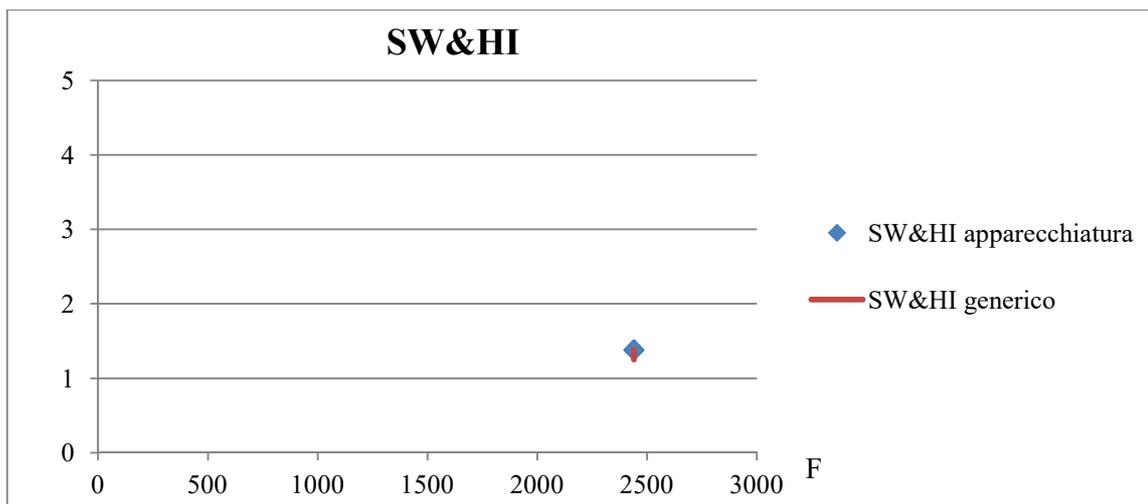
**Figura 3.13.a:** Rappresentazione grafica della dipendenza dell'indice SW&HI in funzione del fattore  $F$  dell'apparecchiatura A, analizzata come unità di trasformazione fisica e contenente n-eptano.



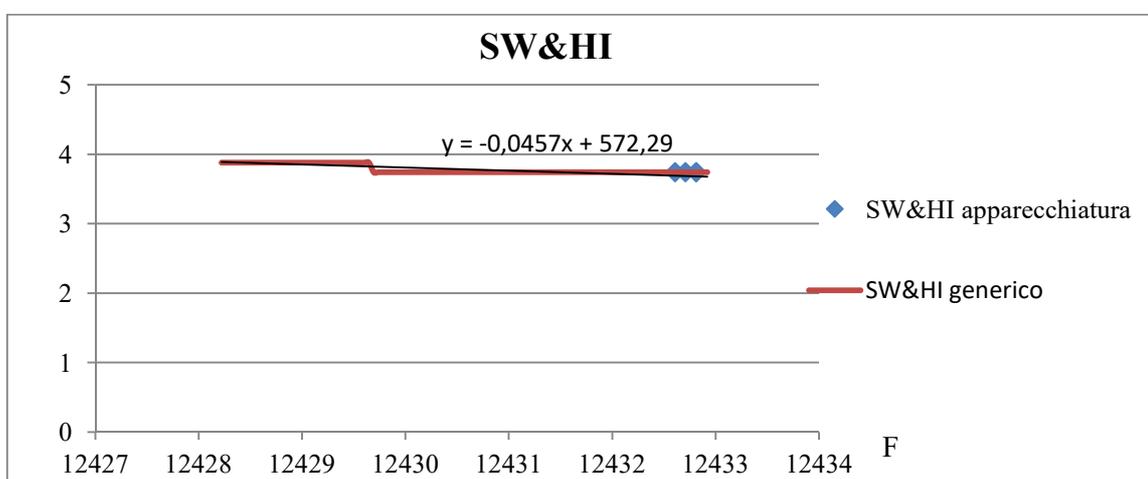
**Figura 3.13.b:** Rappresentazione grafica della dipendenza dell'indice SW&HI in funzione del fattore  $F$  dell'apparecchiatura A, analizzata come unità di trasformazione fisica e contenente metanolo.



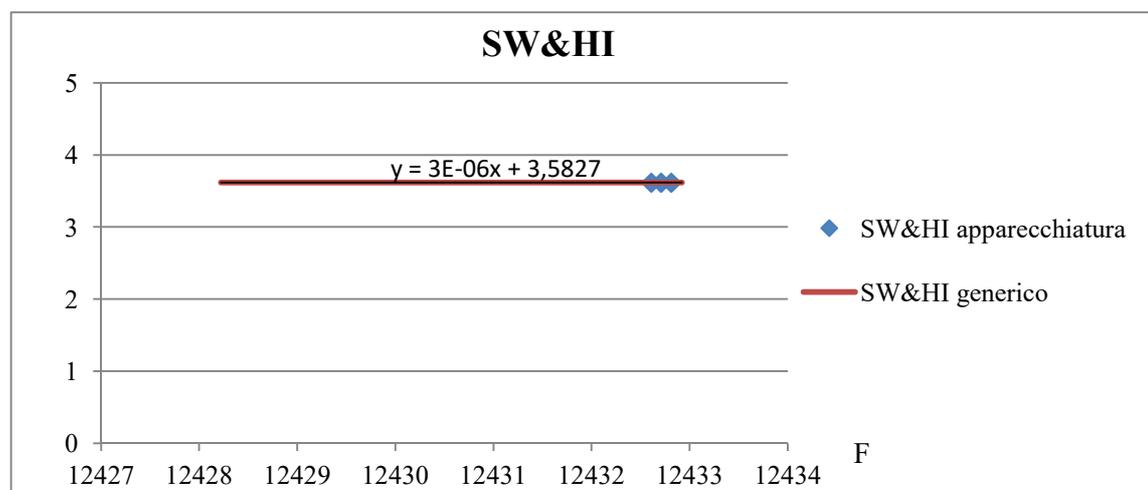
**Figura 3.14.a:** Rappresentazione grafica della dipendenza dell'indice SW&HI in funzione del fattore  $F$  dell'apparecchiatura B, analizzata come unità di trasformazione fisica e contenente metanolo.



**Figura 3.14.b:** Rappresentazione grafica della dipendenza dell'indice SW&HI in funzione del fattore  $F$  dell'apparecchiatura B, analizzata come unità di stoccaggio e contenente metanolo.



**Figura 3.15.a:** Rappresentazione grafica della dipendenza dell'indice SW&HI in funzione del fattore  $F$  dell'apparecchiatura C, analizzata come unità di trasformazione fisica e contenente ossido di etilene.

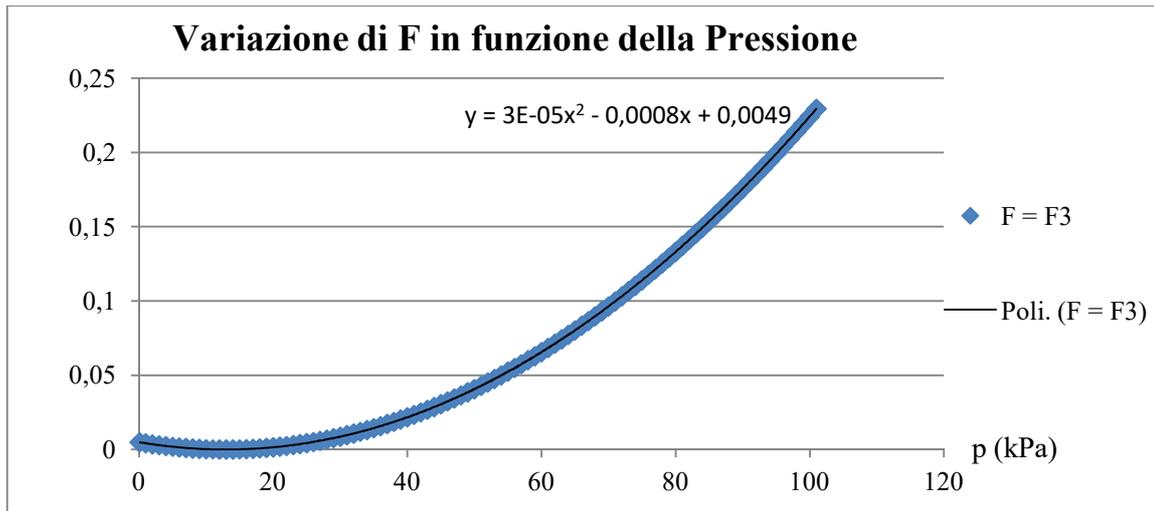


**Figura 3.15.b:** Rappresentazione grafica della dipendenza dell'indice SW&HI in funzione del fattore  $F$  dell'apparecchiatura C, analizzata come unità di stoccaggio e contenente ossido di etilene.

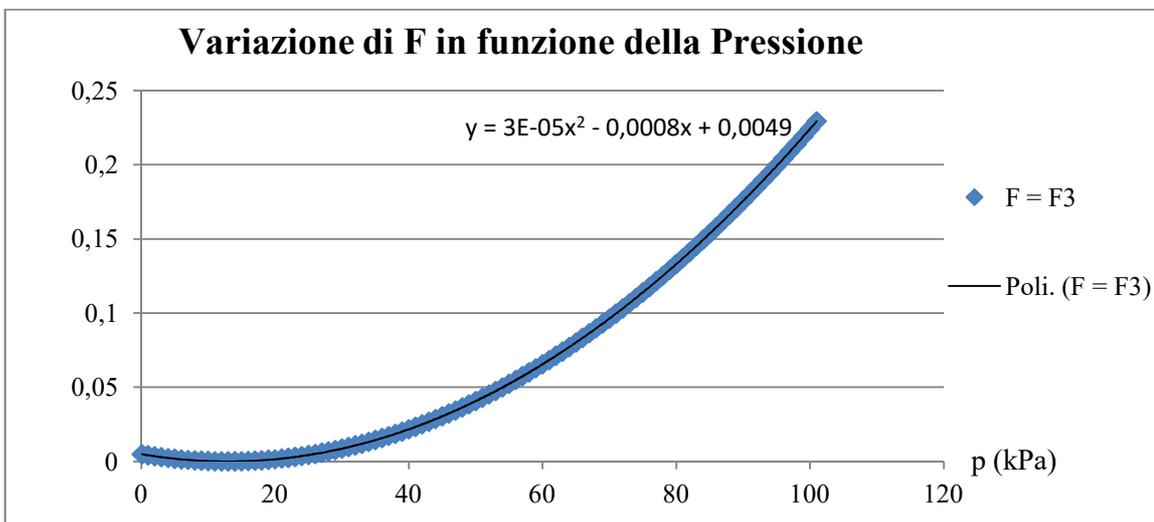
La variazione del parametro  $F$  non influisce sull'indice SW&HI mentre un lieve incremento della penalità  $pn1$  causa un leggero aumento dell'indice. Nel metodo SW&HI la penalità  $pn1$  varia con una funzione a gradino: a seconda delle condizioni che si verificano, la penalità assume un valore piuttosto che un altro. Questo andamento si rispecchia anche sull'indice: in corrispondenza di una variazione a gradino della penalità  $pn1$ , anche l'indice SW&HI presenta una variazione a gradino. Tale andamento non si riscontra nella **Figura 3.14.b** e nella **Figura 3.15.b**: nel primo caso, il parametro  $F$  è pari al fattore  $F2$  che, essendo indipendente dalla temperatura, è costante e anche l'indice rimane invariato (infatti l'indice SW&HI dell'apparecchiatura è un punto, mentre quello generico è una retta verticale molto corta dovuta ad un lieve incremento della penalità  $pn1$ ); nel secondo caso, l'indice non presenta alcuna variazione a gradino in quanto la penalità  $pn1$  rimane costante. La penalità  $pn1$  varia in modo apprezzabile l'indice SW&HI in quanto essa è moltiplicata per il fattore  $F1$  nel calcolo dell'*Hazard Potential*: come osservato in precedenza, questo fattore dipende linearmente dal calore di combustione e se tale proprietà ha un elevato valore, influisce in maniera significativa sull'indice SW&HI. La variazione del parametro  $F$  risulta ininfluente sull'indice SW&HI: anche in questo caso, come per quello del volume, si può affermare che le operazioni che determinano l'*Hazard Potential* e il parametro  $B$  limitano l'effetto della temperatura.

### 3.2.3 Variazione della pressione operativa

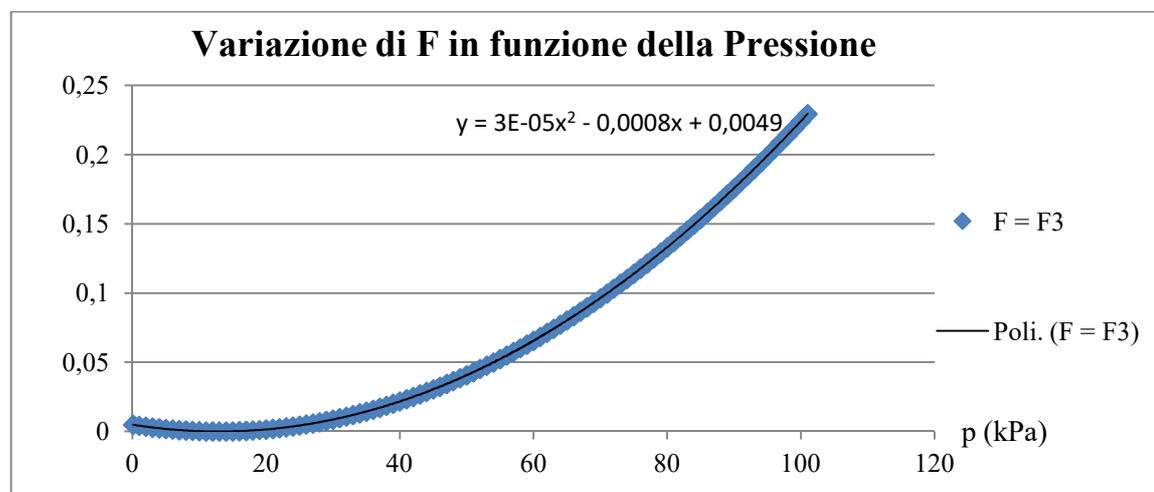
Sia il fattore energetico  $F2$  sia il fattore energetico  $F3$  dipendono linearmente dalla pressione di processo, rispettivamente equazioni (2.10) e (2.11). Si studia come varia il parametro  $F$  in funzione della pressione considerando apparecchiature differenti rispetto a quelle considerate nei casi precedenti in quanto tali apparecchiature operano sempre alla stessa pressione. Per avere una visione più completa, si considerano sia apparecchiature che lavorano in sottovuoto, sia apparecchiature che lavorano in sovrappressione. Però, la variazione di pressione non influenza solamente i fattori energetici  $F2$  e  $F3$ , ma anche la penalità  $pn2$ . La penalità  $pn2$  appare nell'*Hazard Potential* (**Tabella 2.3.**) e quindi influisce sia sul parametro  $B$  sia sull'indice SW&HI. Di seguito, la temperatura e il volume sono parametri noti e costanti, differenti tra un'apparecchiatura ed un'altra, mentre la pressione viene variata in un determinato intervallo: per le apparecchiature che operano in pressione, la pressione è stata variata da 0,1 kPa a 101 kPa con un incremento pari ad 1 kPa; per le apparecchiature che lavorano in sovrappressione, la pressione è stata variata da 101 kPa a 3000 kPa con un incremento pari a 10 kPa (**Figura 3.16; Figura 3.17; Figura 3.18.a; Figura 3.18.b; Figura 3.19.a; Figura 3.19.b; Figura 3.20.a; Figura 3.20.b**). Gli intervalli in cui si varia la pressione e l'incremento sono scelti a piacere: per le apparecchiature che operano in sottovuoto, si è considerato un intervallo di pressione che comprende un vuoto molto spinto (0,1 kPa) fino alla pressione atmosferica con un incremento molto basso (1 kPa) in modo da avere un andamento continuo della variazione del fattore  $F$ ; per le apparecchiature che lavorano in sovrappressione, si è scelto un intervallo che varia dalla pressione atmosferica fino alla pressione maggiore presente all'interno di un'apparecchiatura analizzata nell'azienda (3000 kPa). In questo caso, dato che l'ampiezza dell'intervallo considerato è notevole, si è deciso di assumere un incremento più elevato (10 kPa).



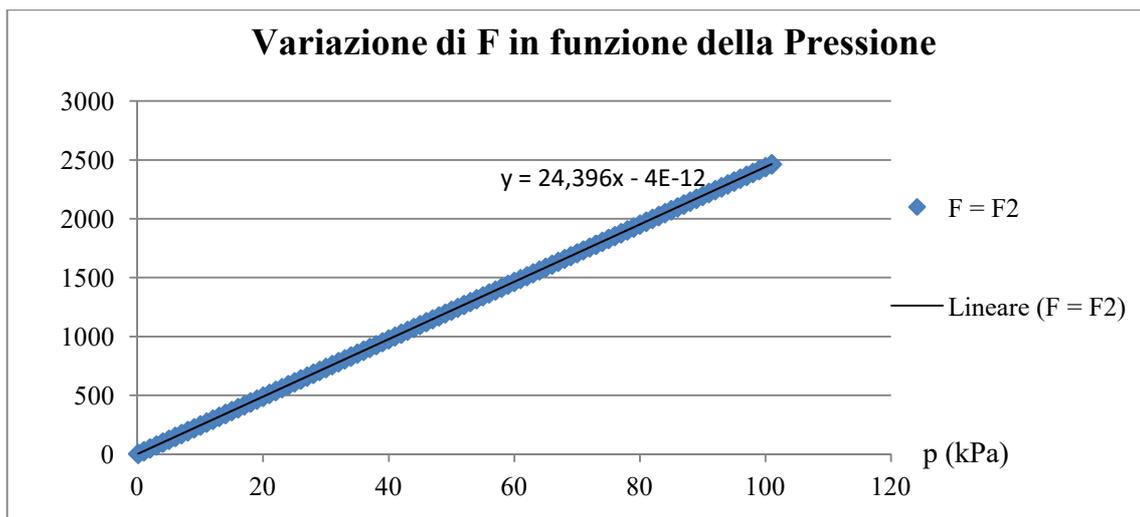
**Figura 3.16:** Rappresentazione grafica della dipendenza del fattore  $F$  in funzione della pressione dell'apparecchiatura A, analizzata come unità di trasformazione fisica e contenente metanolo.



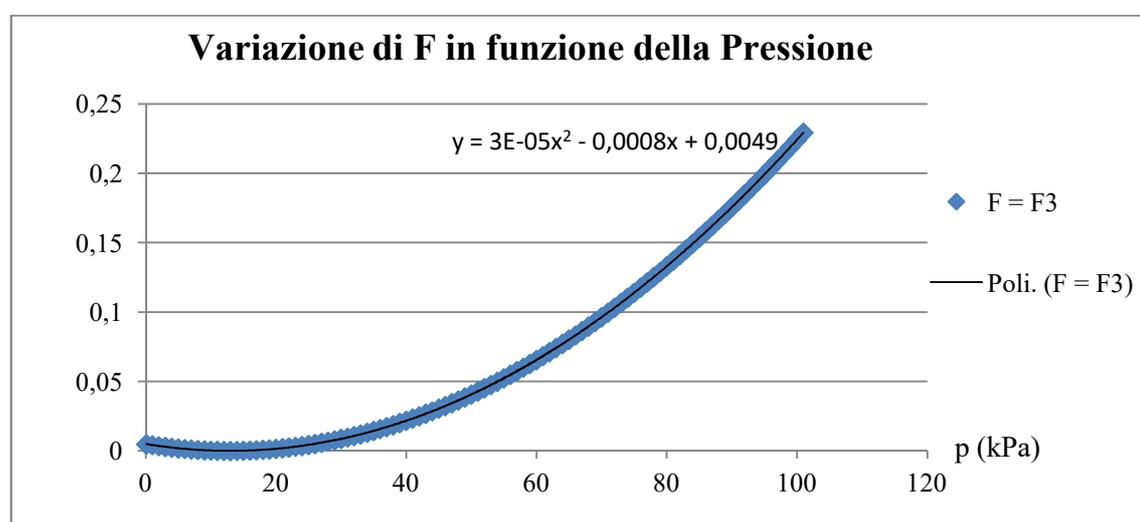
**Figura 3.17:** Rappresentazione grafica della dipendenza del fattore  $F$  in funzione della pressione dell'apparecchiatura B, analizzata come unità di trasformazione fisica e contenente metanolo.



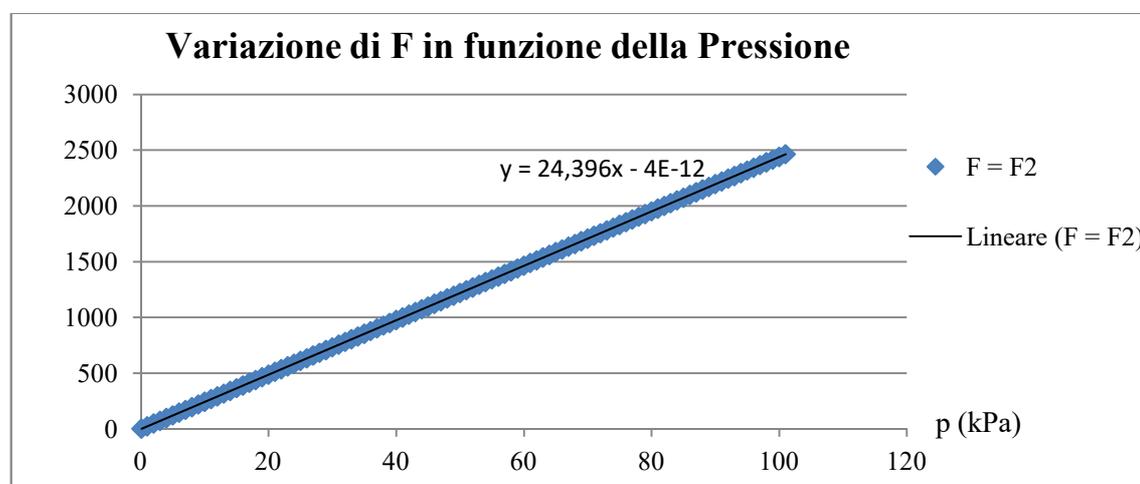
**Figura 3.18.a:** Rappresentazione grafica della dipendenza del fattore  $F$  in funzione della pressione dell'apparecchiatura C, analizzata come unità di trasformazione fisica e contenente metanolo.



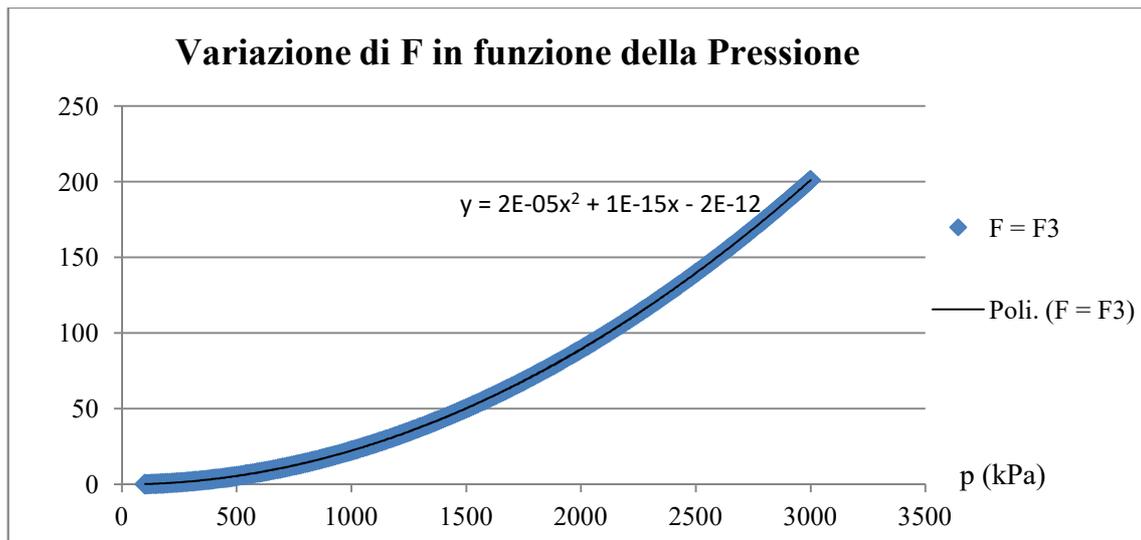
**Figura 3.18.b:** Rappresentazione grafica della dipendenza del fattore  $F$  in funzione della pressione dell'apparecchiatura C, analizzata come unità di stoccaggio e contenente metanolo.



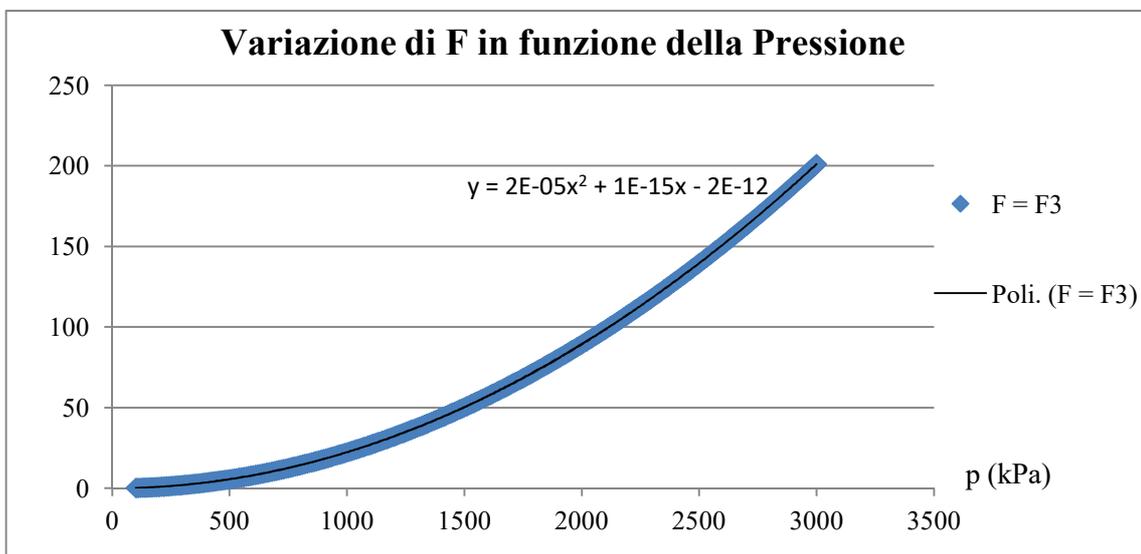
**Figura 3.19.a:** Rappresentazione grafica della dipendenza del fattore  $F$  in funzione della pressione dell'apparecchiatura D, analizzata come unità di trasformazione fisica e contenente metanolo.



**Figura 3.19.b:** Rappresentazione grafica della dipendenza del fattore  $F$  in funzione della pressione dell'apparecchiatura D, analizzata come unità di stoccaggio e contenente metanolo.

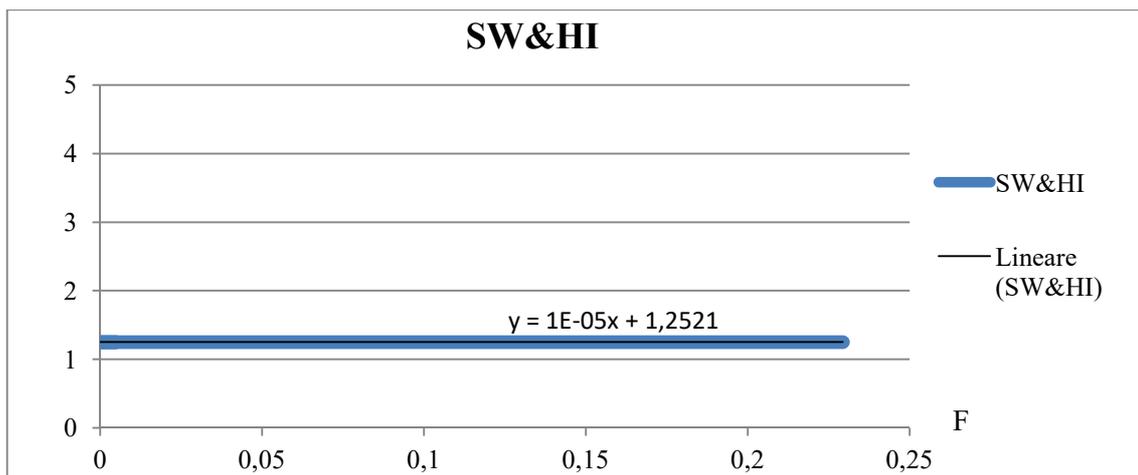


**Figura 3.20.a:** Rappresentazione grafica della dipendenza del fattore  $F$  in funzione della pressione dell'apparecchiatura E, analizzata come unità di trasformazione fisica e contenente idrogeno.

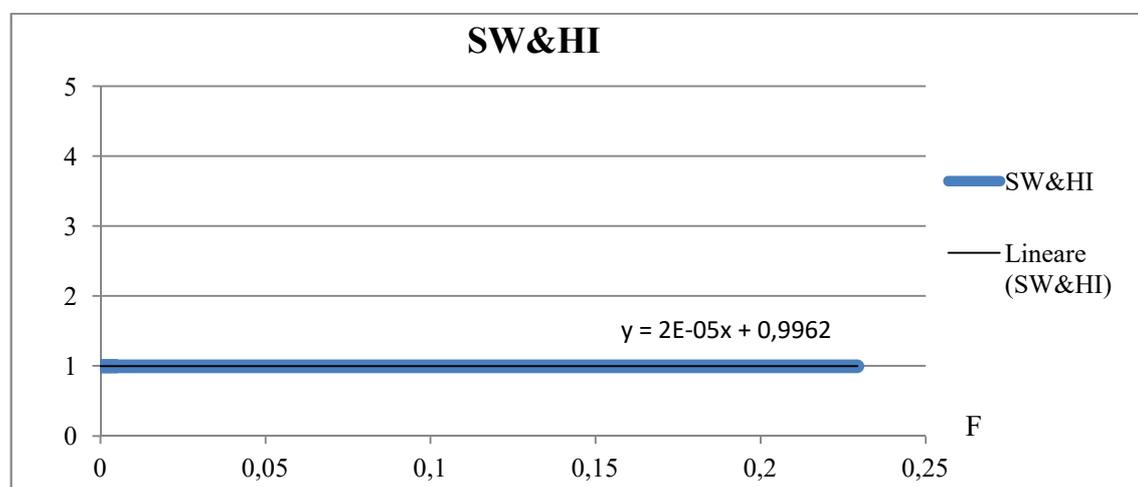


**Figura 3.20.b:** Rappresentazione grafica della dipendenza del fattore  $F$  in funzione della pressione dell'apparecchiatura E, analizzata come unità di reazione chimica e contenente idrogeno.

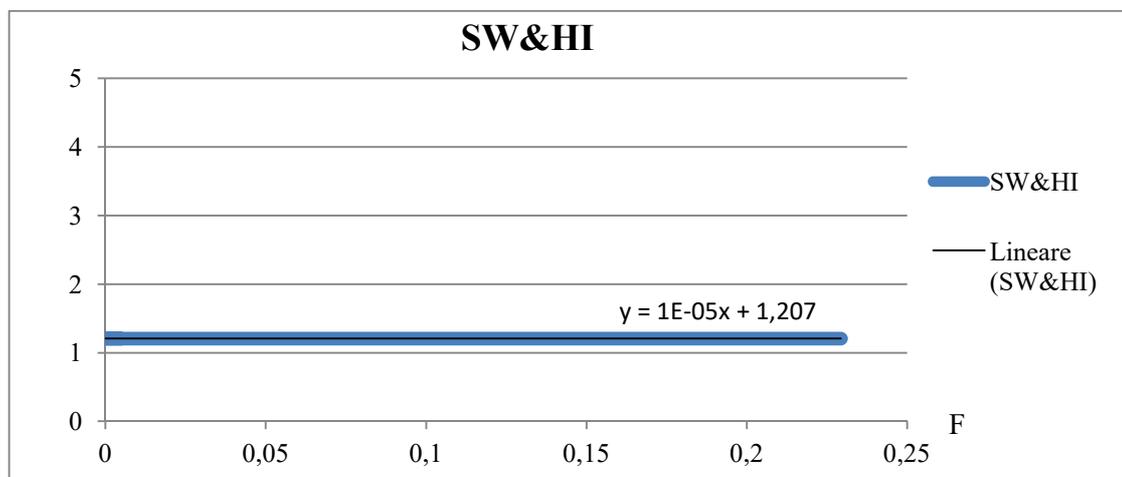
Per le apparecchiature che operano in sottovuoto (A, B, C e D) la curva presenta un minimo nel caso in cui il parametro  $F$  coincide con il fattore energetico  $F3$  (andamento polinomiale di secondo grado): il minimo è dovuto dal fattore moltiplicativo costituito dal quadrato della differenza tra la pressione di processo e la tensione di vapore, equazione (2.11). Quando il parametro  $F$  è pari al fattore energetico  $F2$ , equazione (2.10), esso aumenta linearmente con l'incremento della pressione operativa, infatti le due variabili sono direttamente proporzionali. Per le apparecchiature che operano in sovrappressione (E), la differenza tra la pressione di processo e la tensione di vapore è sempre positiva, di conseguenza il parametro  $F$  aumenta sempre a fronte di un incremento della pressione. Dato che un'elevata variazione della pressione causa un apprezzabile cambiamento di  $F$ , si analizza l'influenza del fattore  $F$  sull'indice SW&HI, tenendo conto anche della variazione della penalità  $pn2$  (Figura 3.21; Figura 3.22; Figura 3.23.a; Figura 3.23.b; Figura 3.24.a; Figura 3.24.b; Figura 3.25.a; Figura 3.25.b).



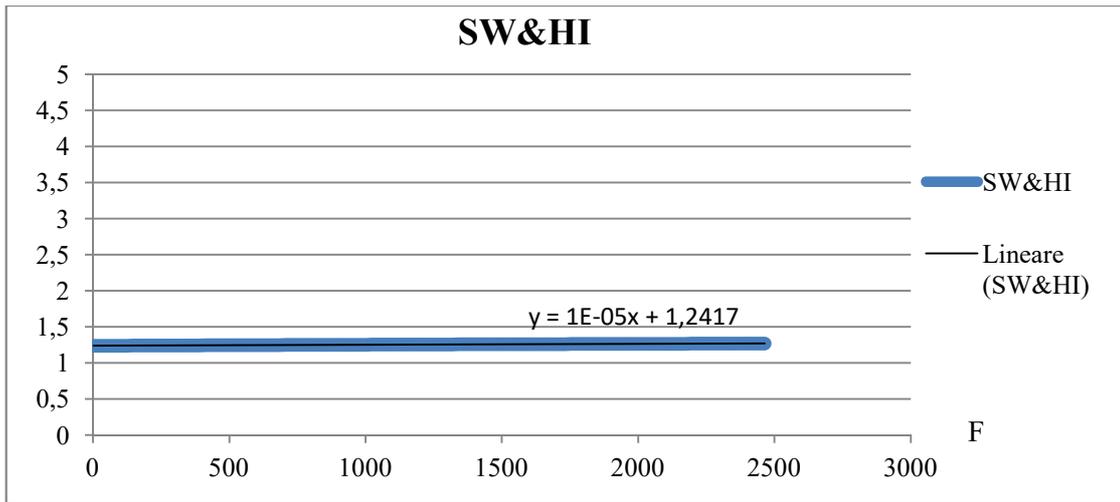
**Figura 3.21:** Rappresentazione grafica della dipendenza dell'indice SW&HI in funzione del fattore  $F$  dell'apparecchiatura A, analizzata come unità di trasformazione fisica e contenente metanolo.



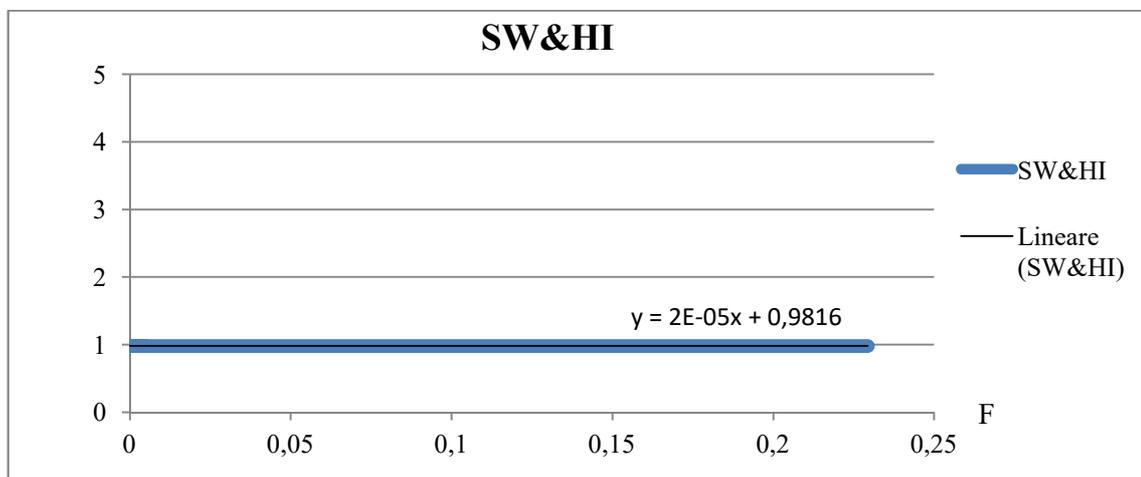
**Figura 3.22:** Rappresentazione grafica della dipendenza dell'indice SW&HI in funzione del fattore  $F$  dell'apparecchiatura B, analizzata come unità di trasformazione fisica e contenente metanolo.



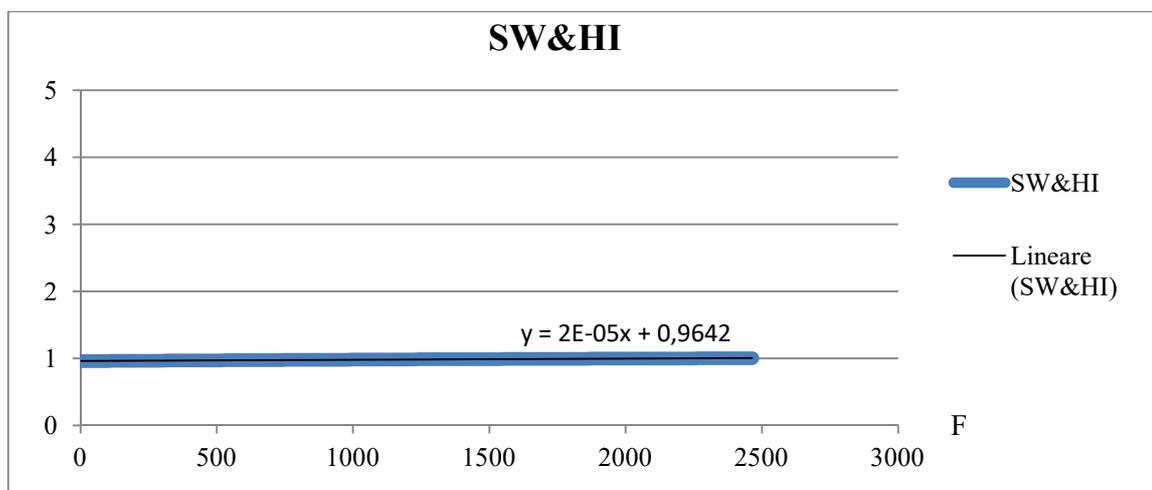
**Figura 3.23.a:** Rappresentazione grafica della dipendenza dell'indice SW&HI in funzione del fattore  $F$  dell'apparecchiatura C, analizzata come unità di trasformazione fisica e contenente metanolo.



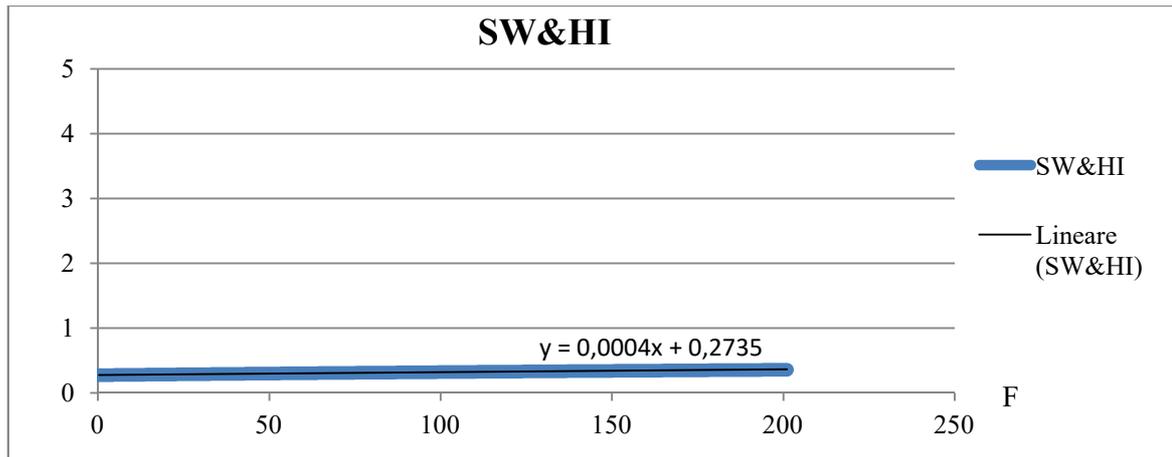
**Figura 3.23.b:** Rappresentazione grafica della dipendenza dell'indice SW&HI in funzione del fattore  $F$  dell'apparecchiatura C, analizzata come unità di stoccaggio e contenente metanolo.



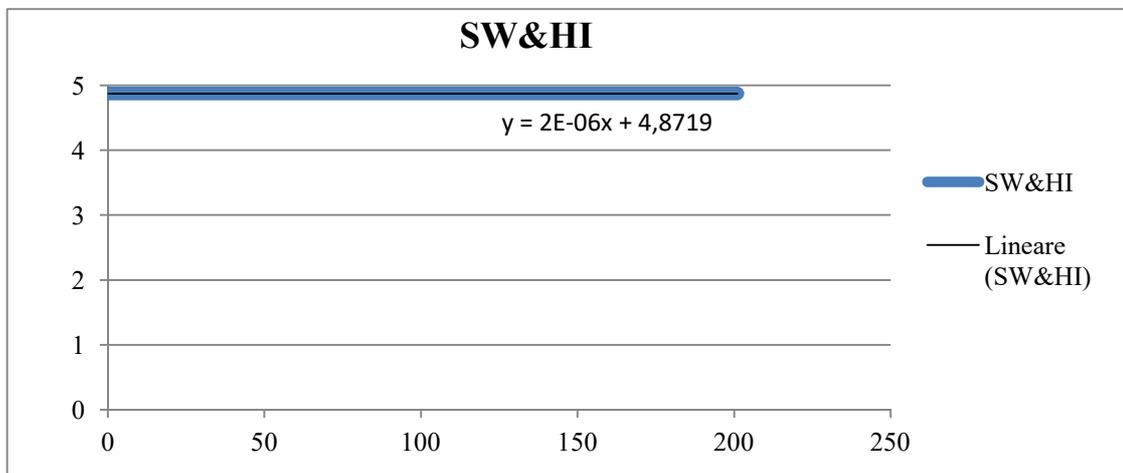
**Figura 3.24.a:** Rappresentazione grafica della dipendenza dell'indice SW&HI in funzione del fattore  $F$  dell'apparecchiatura D, analizzata come unità di trasformazione fisica e contenente metanolo.



**Figura 3.24.b:** Rappresentazione grafica della dipendenza dell'indice SW&HI in funzione del fattore  $F$  dell'apparecchiatura C, analizzata come unità di stoccaggio e contenente metanolo.



**Figura 3.25.a:** Rappresentazione grafica della dipendenza dell'indice SW&HI in funzione del fattore  $F$  dell'apparecchiatura D, analizzata come unità di trasformazione fisica e contenente idrogeno.



**Figura 3.25.b:** Rappresentazione grafica della dipendenza dell'indice SW&HI in funzione del fattore  $F$  dell'apparecchiatura D, analizzata come unità di reazione chimica e contenente idrogeno.

L'indice SW&HI risulta indipendente sia dal parametro  $F$  sia dalla penalità  $pn2$ : le due variabili, nell'equazione dell'*Hazard Potential*, vengono moltiplicate tra loro, sommate al prodotto tra il fattore energetico  $F1$  e la penalità  $pn1$  e, infine, sono moltiplicate per tutte le restanti penalità (**Tabella 2.3.**). Il prodotto del parametro  $F$  con la penalità  $pn2$  è trascurabile rispetto al prodotto del fattore energetico  $F1$  con la penalità  $pn1$ . Infatti, poiché il fattore  $F1$  è direttamente proporzionale al calore di combustione (equazione 2.9), esso assume valori molto maggiori rispetto a quelli del parametro  $F$ , soprattutto quando quest'ultimo equivale al fattore energetico  $F3$ . Per le apparecchiature in sottovuoto la penalità  $pn2$  varia in modo lineare e non tramite una funzione a gradino (come invece avviene per la penalità  $pn1$ ), di conseguenza non si riscontra un'apprezzabile variazione del grafico dovuta dalla variazione della penalità  $pn2$ . Per le apparecchiature in sovrappressione,  $pn2$  varia tramite una funzione a gradino, ma in questo caso tale variazione non influenza in modo significativo né il parametro  $F$  né l'indice SW&HI. Quindi, un'elevata variazione della pressione causa un apprezzabile cambiamento del parametro  $F$  ma risulta ininfluente sull'indice SW&HI: anche in questo caso, si può ipotizzare che le operazioni da eseguire per quantificare l'*Hazard Potential* e il parametro  $B$  limitano l'effetto della pressione.

### 3.3 Effetto del fattore energetico $F4$

Il fattore  $F4$  è presente nell'equazione dell'*Hazard Potential* solamente nel caso in cui un'apparecchiatura viene analizzata come unità di reazione chimica [1], infatti rappresenta l'energia liberata della reazione chimica, equazione (2.12). Il calore di reazione ( $H_{rxn}$ ) compare solo nell'equazione di questo fattore: tale proprietà non risulta sempre necessaria per determinare il valore dell'indice SW&HI.

#### 4. Adattamento del metodo SW&HI al Decreto Legislativo 08/03/2006

Nel lavoro proposto, si sviluppa un metodo per effettuare la valutazione del rischio incendio ed esplosione in un ambito lavorativo italiano che produce un elevato quantitativo di sostanze chimiche utilizzate per la produzione di polimeri, nel campo della cosmetica ed in altri settori industriali. Si è potuto applicare il metodo SW&HI a tale industria in quanto essa tratta grandi quantitativi di sostanze infiammabili, come metanolo, n-eptano, acido formico. L'azienda è suddivisa in reparti in base alla produzione ed ogni reparto è costituito da linee produttive che operano prevalentemente in continuo. In questa realtà lavorativa, abbiamo considerato solamente le caratteristiche infiammabili delle sostanze, di conseguenza il parametro *B* coincide con *B1* e non è stato mai necessario valutare il parametro *B2*. Quindi, si è potuto creare un parallelismo tra i crediti (*cr*) del metodo [1], necessari per determinare il parametro *A*, e le strategie antincendio (*S*) presenti nel D. Lgs 8 marzo 2006, n.139 [3] (**Tabella 4.1.**; **Tabella 4.2.**).

**Tabella 4.1.** Strategie antincendio previste dal D. Lgs 08/03/ 2006.

N°	Strategie antincendio DM	Significato
S1	Reazione al fuoco	Limitazione dell'innesco e della propagazione dell'incendio
S2	Resistenza al fuoco	Relativo ad ogni singola apparecchiatura ed è necessaria per permettere agli occupanti di raggiungere un luogo sicuro
S3	Compartimentazione	Riduzione della propagazione dell'incendio verso le altre unità
S4	Esodo	Assicurare gli occupanti di raggiungere un luogo sicuro prima che l'incendio divampi ed ostruisca i percorsi di emergenza
S5	Gestione sicurezza antincendio	Garanzia, nel tempo, di un adeguato livello di sicurezza in caso di incendio
S6	Controllo dell'incendio	Installazione di dispositivi per inibire, controllare ed estinguere un incendio
S7	Rilevazione ed allarme	Sorveglianza e rilevazione di un ambito in cui è possibile che si formi un incendio
S8	Controllo di fumi e calore	I prodotti di combustione generati durante un incendio devono essere controllati, evacuati e smaltiti correttamente
S9	Operatività antincendio	Facilita l'intervento dei vigili del fuoco
S10	Sicurezza impianti tecnologici e servizio	Prevenzione, protezione e gestione degli impianti durante un incendio

**Tabella 4.2.** Parallelismo tra i crediti del metodo SW&HI e le strategie del decreto del 2019.

Crediti	Strategie associate	Crediti	Strategie associate
cr1 tot	S4, S5, S9	cr4 tot	
cr1-1	S4, S9	cr4-1	S6, S7
cr1-2	S5, S6	cr4-2	S6, S7
cr1-3	S4	cr4-3	S6, S7
cr1-4		cr4-4	S6, S7
cr1-5	S4, S5, S9	cr4-5	S6, S7
cr2 tot	S10	Cr5 tot	
cr2-1	S5	cr5-1	S3
cr2-2	S1, S2, S6	cr5-2	S6
cr2-3	S5	cr5-3	S6
cr2-4	S4, S5	cr5-4	S2, S3, S6, S7
cr2-5	S4, S5, S9		
cr2-6	S4, S5, S9	cr6 tot	
		cr6-1	S2, S3, S6, S7
cr3 tot		cr6-2	S2, S3, S6, S7
cr3-1	S2	cr6-3	S1, S3, S6, S7
cr3-2-1	S1, S2, S3, S6, S7	cr6-4	S1, S3, S6, S7, S8
cr3-2-2	S1, S2, S3, S6, S7		
cr3-2-3	S1, S2, S3, S6, S7	cr7 tot	
cr3-2-4	S1, S2, S3, S6, S7	cr7a	S6
cr3-2-5	S1, S2, S3, S6, S7	cr7b-1	S4
cr3-2 tot		cr7b-2	S4
cr3-3	S1, S2, S3, S6, S7	cr7b-3	S4
cr3-4	S1, S2, S3, S6, S7	cr7b-4	S4
		cr8	

La classificazione del rischio incendio associato ai posti di lavoro risale al DM 10/03/1998 dove il livello di rischio è definito come basso, medio o alto [13].

Rischio basso, se *"sono presenti delle sostanze con basso tasso di infiammabilità e le condizioni locali e di esercizio offrono scarse possibilità di sviluppo di principi di incendio ed in cui, in caso di incendio, la probabilità di propagazione dello stesso è da ritenersi limitata"*.

Rischio medio, se *"sono presenti delle sostanze infiammabili e/o condizioni locali e/o di esercizio che possono favorire lo sviluppo di incendi, ma nei quali, in caso di incendio, la probabilità di propagazione dello stesso è da ritenersi limitata"*.

Rischio alto, se *"sono presenti sostanze altamente infiammabili e/o per le condizioni locali e/o di esercizio sussistono notevoli probabilità di sviluppo di incendi e nella fase iniziale sussistono forti probabilità di propagazione delle fiamme, ovvero non è possibile la classificazione come luogo a rischio di incendio basso o medio"* [13].

Nel metodo SW&HI, è il valore dell'indice che indica il livello del rischio incendio (**Figura 2.2**) e, tale valore, non dipende solamente da difetti di funzionamento dell'apparecchiatura, ma anche dagli strumenti antincendio che sono presenti sull'apparecchiatura stessa. Tali strumenti antincendio, nel DM sono presenti sottoforma di

strategie antincendio (**Tabella 4.2.**) e devono essere applicati su ogni apparecchiatura considerata a rischio incendio. Le strategie antincendio servono per prevenire ed ostacolare lo sviluppo e la propagazione di un incendio [3] e vengono identificate con l'acronimo:

- RTV, regole tecniche verticali, applicabili ad una specifica attività o ad ambiti di essa, in specifiche condizioni;
- RTO, regole tecniche orizzontali, applicabili a tutte le attività lavorative, ad esclusione di quelle che rientrano nelle RTV.

La regola tecnica verticale (RTV) può essere sostitutiva o complementare alla regola tecnica orizzontale (RTO) [3]. Tale valutazione viene eseguita in modo da assicurare:

- la sicurezza della vita umana;
- l'incolumità delle persone;
- la tutela dei beni e dell'ambiente.

Basandosi su questi criteri, nel paragrafo S.6.3 "*Criteri di attribuzione dei livelli di prestazione*" del Decreto del Legislativo [3], si classificano le aziende in base al livello di prestazione: I, II, III, IV, V (**Tabella 4.3.**).

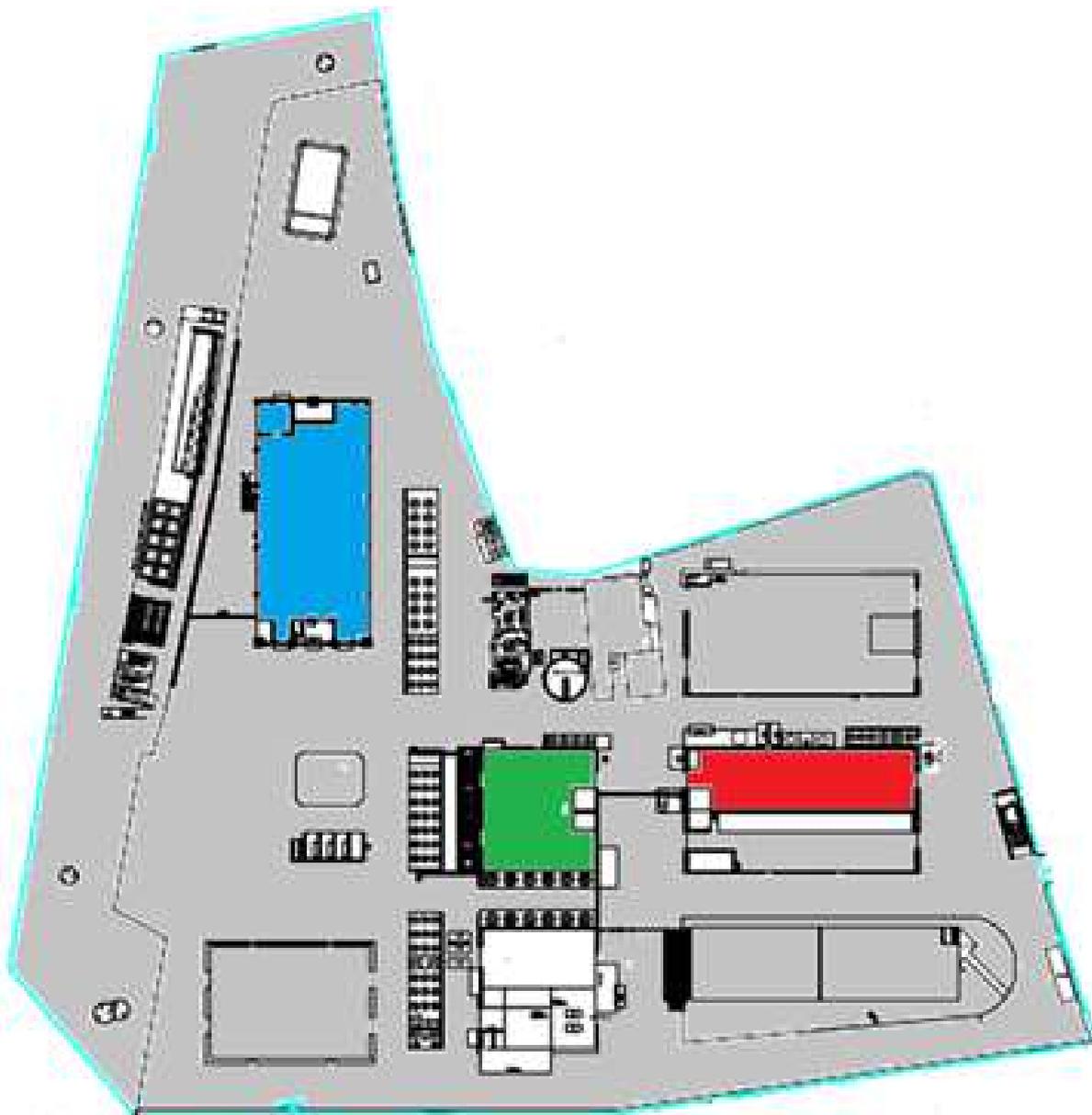
**Tabella 4.3.** Classificazione delle aziende in base al Decreto Ministeriale.

<b>Livello di prestazione</b>	<b>Criteri di attribuzione</b>
I	Aziende che non trattano sostanze pericolose
II	Aziende in cui i profili di rischio della vita, dei beni e dell'ambiente ricadono in determinate categorie, che non utilizzano un elevato quantitativo di sostanze pericolose o delle lavorazioni pericolose
III	Aziende che non rientrano negli altri livelli di prestazione
IV	Aziende collocate in zone limitrofe ad elevati affollamenti, con geometria complessa o con piani interrati e con un elevato carico di incendio
V	Aziende progettate su specifica del committente per svolgere attività di particolare importanza

La realtà lavorativa analizzata non può rientrare nelle categorie I e II in quanto l'azienda utilizza sistematicamente notevoli quantitativi di sostanze infiammabili. Tuttavia, non si riscontrano elementi tali da ascrivere l'azienda alle categorie IV e V, pertanto si assume che l'azienda rientri nella categoria III.

## 5. Applicazione del metodo SW&HI

L'azienda analizzata è suddivisa in reparti in base alla produzione e ogni reparto è costituito da alcune linee produttive (**Figura 5.1**).



**Figura 5.1:** Mappa dello stabilimento nella quale sono stati evidenziati i reparti analizzati (scala 1:1250).

I reparti d'interesse sono il reparto A, evidenziato in verde scuro, il reparto B, evidenziato in blu, il reparto C, evidenziato in rosso scuro. Per ogni reparto, si sono acquisite numerose informazioni sullo sviluppo di ogni processo condotto al loro interno e sulle apparecchiature utilizzate (**Tabella 2.2**). In appositi database [7], [8], si sono cercate le schede di sicurezza di tutte le sostanze presenti all'interno del sito aziendale: esse riportano i principali pericoli della sostanza considerata (infiammabile, esplosiva, tossica, pericolosa per l'ambiente...). In questa maniera è stato possibile identificare le apparecchiature che contengono delle sostanze

infiammabili (evidenziate in azzurro nelle figure successive) e stabilire l'unità logica alla quale possono essere ricondotte (**Tabella 2.1**). Infatti, per associare un'unità logica ad ogni apparecchiatura, è stato necessario capire il suo funzionamento e ipotizzare la fase in cui si può verificare il rilascio della sostanza infiammabile contenuta in essa (**Tabella 5.1**).

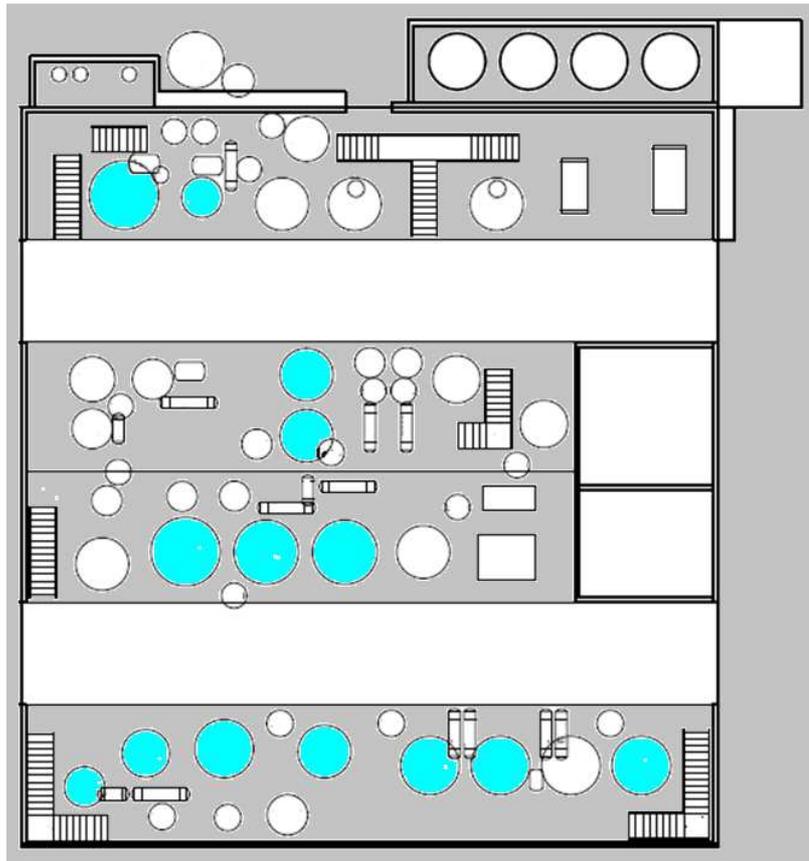
**Tabella 5.1.** Associazione di un'apparecchiatura all'unità logica in base alla modalità di rilascio.

Apparecchiatura	Fase di rilascio	Unità logica associata
Serbatoio	Durante l'accumulo	Stoccaggio
	Carico e scarico	Trasformazione fisica
Reattore	Carico e/o scarico	Trasformazione fisica
	Durante la reazione	Trasformazione chimica
Raccoglitore	Carico e/o scarico	Trasformazione fisica
Separatore	Carico e/o scarico	Trasformazione fisica
Per il lavaggio	Carico e/o scarico	Trasformazione fisica
Miscelatore	Carico e/o scarico	Trasformazione fisica
	Durante fase di miscelazione	Trasformazione fisica
Evaporatore	Carico e/o scarico	Trasformazione fisica
Condensatore	Carico e/o scarico	Trasformazione fisica
Purificatore	Carico e/o scarico	Trasformazione fisica
Distillatore	Carico e/o scarico	Trasformazione fisica
Cristallizzatore	Carico e/o scarico	Trasformazione fisica
Filtrazione	Carico e/o scarico	Trasformazione fisica
Essiccatore	Carico e/o scarico	Trasformazione fisica

Alcune apparecchiature (come i serbatoi e i reattori) vengono associate a due diverse unità logiche: un eventuale rilascio si può verificare in due differenti situazioni. Si valuta l'indice SW&HI per entrambe le unità associate e si considera l'unità avente l'indice SW&HI più elevato: per esempio, se si analizza un serbatoio che contiene una sostanza infiammabile, un eventuale rilascio di tale sostanza si può verificare sia durante la fase di carico e/o scarico, sia durante la fase di stoccaggio. L'apparecchiatura viene analizzata rispettivamente come unità di trasformazione fisica e come unità di stoccaggio: se per la trasformazione fisica si calcola un indice SW&HI di 3,9 e per la fase di stoccaggio un indice di 4,3, il serbatoio dovrà essere considerato come unità di stoccaggio poiché l'indice SW&HI calcolato è maggiore. Le unità logiche "*Trasporto*" e "*Altre unità*" non compaiono nella tabella in quanto non vi è alcuna apparecchiatura riconducibile a queste unità logiche.

Il reparto A (**Figura 5.2**) è costituito da 3 linee produttive:

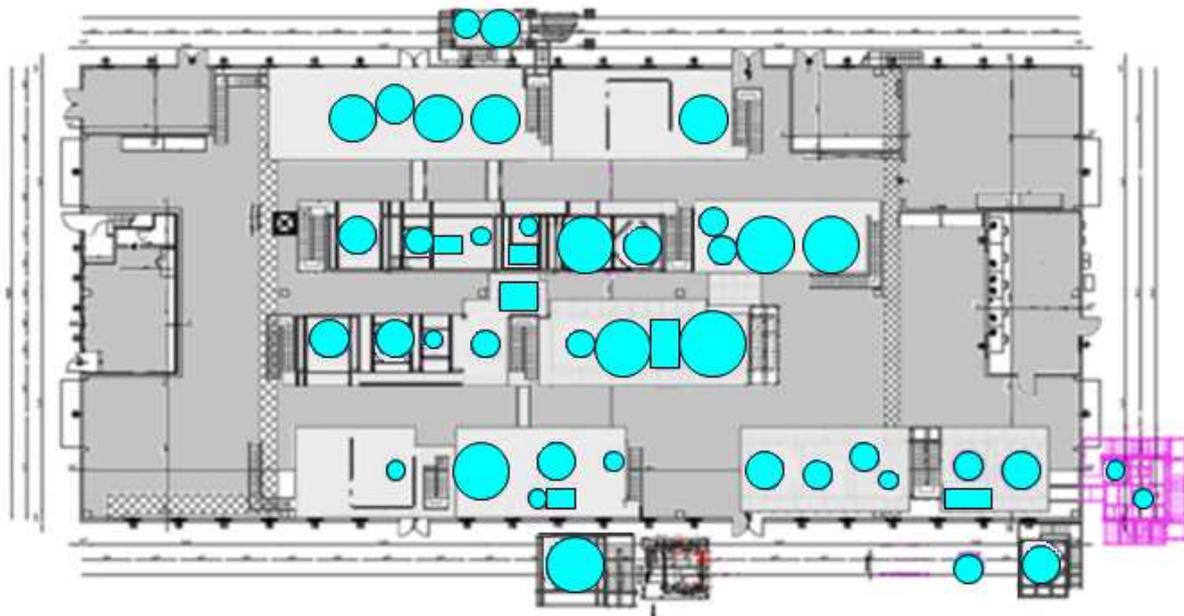
- nella prima linea la sostanza pericolosa identificata è il dipropilenglicole;
- nella seconda linea è l'alcol 2 etilesilico;
- nella terza linea è l'ossido di etilene.



**Figura 5.2:** Mappa del reparto A nel quale sono evidenziate le apparecchiature analizzate (scala 1:500).

Le prime due linee di produzione sviluppano entrambe delle reazioni di esterificazioni e di amidazione, ma esse coinvolgono sostanze diverse e sono condotte in diverse condizioni operative: la prima linea opera a 40 °C e a 30 kPa e il dipropilenglicole è un prodotto di reazione, di conseguenza le apparecchiature sono analizzate come unità di trasformazione chimica e come unità di trasformazione fisica (un eventuale rilascio di sostanza pericolosa può avvenire sia in fase di reazione sia in fase di scarico); la seconda linea opera a 180 °C e a 10 kPa e l'alcol 2 etilesilico è un reagente della reazione, di conseguenza le apparecchiature vengono considerate come unità di trasformazione fisica (la reazione chimica che si sviluppa è leggermente esotermica e/o endotermica, quindi ha un calore di combustione non rilevante). La terza linea di produzione è costituita dall'ossietilazione di un substrato: i serbatoi che contengono l'ossido di etilene utilizzato durante il processo produttivo sono mantenuti a 15°C ed a 500 kPa, mentre le apparecchiature che costituiscono la linea di produzione operano a 160 °C e a 300 kPa. I serbatoi vengono analizzati sia come unità di stoccaggio sia come unità di trasformazione fisica (un eventuale rilascio si può verificare in fase di accumulo o durante la fase di carico e/o di scarico del serbatoio stesso), mentre le apparecchiature che costituiscono il processo sono considerate solamente come unità di trasformazione fisica, dato che il rilascio è possibile solamente durante la fase di carico dell'apparecchiatura analizzata.

Il reparto B (**Figura 5.3**) è costituito da 12 linee produttive, dalle quali si ottengono 6 diversi prodotti (P1, P2, P3, P4, P5, P6), quindi più linee vengono utilizzate per ottenere uno stesso prodotto.

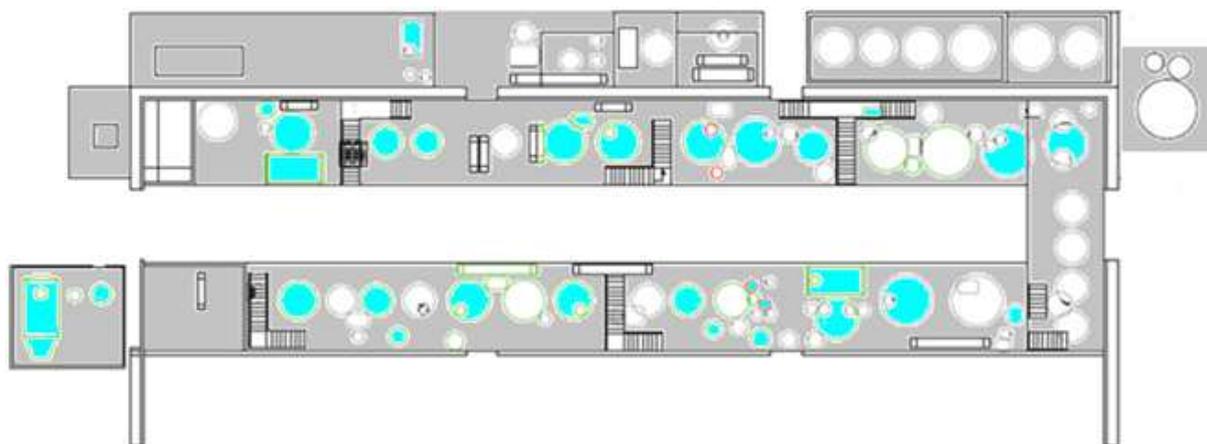


**Figura 5.3:** Mappa delle sole apparecchiature contenenti sostanze infiammabili nel reparto B (scala 1:100).

Nelle linee di produzione di P1 la sostanza infiammabile individuata è il metanolo e tutte le apparecchiature operano a 160 °C e con un grado di vuoto abbastanza spinto (varia da 0,5 kPa a 20 kPa). Dato che la reazione che viene svolta in queste linee è una transesterificazione, che non è caratterizzata da una esotermia rilevante, tutte le apparecchiature contenenti metanolo vengono analizzate come trasformazione fisica, ipotizzando un possibile rilascio in fase di carico e/o scarico dell'apparecchiatura, e/o come unità di stoccaggio, nel caso in cui fossero utilizzate come raccoglitori. Nelle linee di produzione di P2, le sostanze infiammabili presenti nella linea sono n-eptano e metanolo. Il processo viene sviluppato ad alte temperature (130-170 °C), a pressione atmosferica e prevede la disidratazione del n-eptano: essendo un processo fisico, rientra nelle unità logiche "*trasformazione fisica*". Il processo è costituito da una transesterificazione e da una policondensazione, per le stesse motivazioni relative alla prima linea, le apparecchiature contenenti sostanze infiammabili sono state analizzate come trasformazione fisica o come unità di stoccaggio, a seconda della tipologia di apparecchiatura considerata (**Tabella 5.1.**). Nella linea di produzione di P3, l'unica sostanza infiammabile identificata è il n-eptano, il quale viene trattato in un intervallo di temperatura che varia da 95 °C a 160 °C e in un range di pressione che varia dalla pressione atmosferica a 120 kPa. Poiché il processo non è costituito da una reazione esotermica, anche in questo caso le apparecchiature sono analizzate come unità di trasformazione fisica e/o come unità di stoccaggio, in base alla loro funzione (**Tabella 5.1.**). Nella linea di produzione di P4, le sostanze infiammabili presenti sono il n-eptano (reagente di reazione), la paraformaldeide (sottoprodotto di reazione), il metanolo (prodotto di reazione) e l'acido formico (sottoprodotto di reazione). L'unica apparecchiatura che lavora ad alta temperatura (170 °C) è il reattore nel quale avviene il processo di sintesi del prodotto, mentre le altre apparecchiature operano a 30 °C. In questa linea, la pressione delle apparecchiature può variare da un vuoto pari a 15,2 kPa alla pressione atmosferica. Poiché il processo di sintesi non è costituito da una reazione esotermica, anche in questo caso le apparecchiature sono analizzate come unità di trasformazione fisica e/o come unità di stoccaggio, in base alla loro funzione (**Tabella 5.1.**). Nella linea di produzione di P5, l'unica sostanza infiammabile identificata è il n-eptano, il quale viene trattato in un intervallo di temperatura che varia da 90 °C a 200 °C e in un intervallo di pressione che varia da 50 kPa a 600 kPa. In questa linea avvengono solamente

delle trasformazioni fisiche, di conseguenza le apparecchiature sono state analizzate come trasformazioni fisiche e/o come unità di stoccaggio. Nella linea di produzione di P6 sono presenti le seguenti sostanze infiammabili: idrogeno (reagente), n-eptano (reagente), HTMP (prodotto). le apparecchiature lavorano in sovrappressione (da 800 a 3000 kPa) ed a 85-105 °C. Anche in questo caso, la reazione che si sviluppa non è da considerare pericolosa, di conseguenza le apparecchiature vengono analizzate come unità di trasformazione fisica e/o di stoccaggio.

Il reparto C (**Figura 5.4**) produce 4 differenti prodotti (P7, P8, P9, P10): le reazioni sviluppate in questo reparto sono debolmente esotermiche o endotermiche, di conseguenza nessuna apparecchiatura è stata analizzata come unità di trasformazione chimica.



**Figura 5.4:** Mappa del reparto C nel quale sono evidenziate le apparecchiature analizzate (scala 1:200).

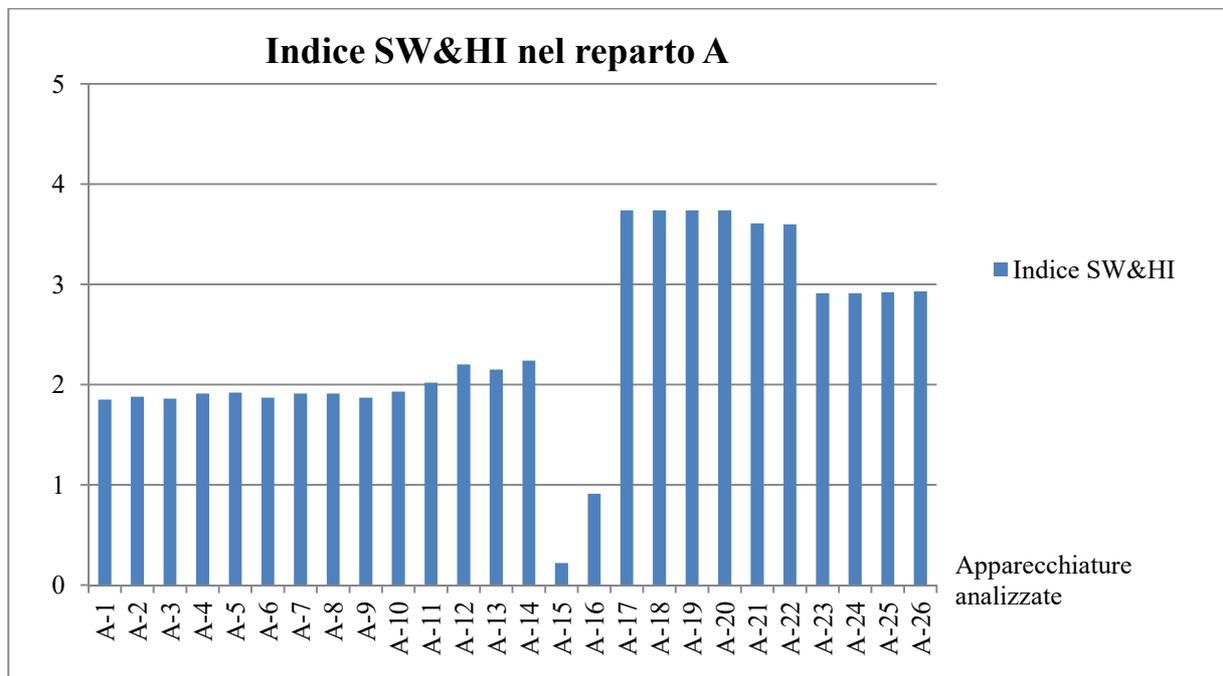
Le apparecchiature sono state analizzate come unità di trasformazione fisica e/o come unità di stoccaggio, in base alla fase in cui si è ipotizzato un possibile rilascio (**Tabella 5.1.**). Le sostanze infiammabili identificate in queste linee di produzione sono etanolo (prodotto di reazione), eptano (reagente di reazione), toluene (reagente di reazione), dietanolamina (DEA) (reagente di reazione), sodio metilato (reagente di reazione), metanolo (sottoprodotto di reazione), monoetanolamina (MEA) (reagente di reazione). Il prodotto P7 viene sviluppato in due fasi: una ad alta temperatura (140-170 °C), l'altra a temperatura più moderate (35-80 °C). Le apparecchiature operano o a pressione atmosferica o in sottovuoto molto spinto (0,1 kPa - 20 kPa). Il prodotto P8 viene sviluppato a pressione atmosferica ed a 50 °C, per essere poi stoccato a 75 °C ed a 2 kPa. I prodotti P9 e P10 vengono sintetizzati ad alta temperatura, rispettivamente a 150 °C ed a 170 °C, e a pressione atmosferica.

Applicando il metodo SW&HI in tutti i reparti precedentemente descritti, è stato possibile identificare l'area in cui avviene un danno moderato al 50% di strutture e di persone in caso di un rilascio accidentale di una sostanza infiammabile. Si è assunto che le apparecchiature con un indice SW&HI minore di 5 operano già in sicurezza e, quindi, non è necessario aggiungere ulteriori dispositivi di controllo. Quando l'indice risulta maggiore di 5, si deve effettuare un'analisi più approfondita per determinare:

- il motivo per il quale l'apparecchiatura è a rischio;
- i dispositivi di controllo da aggiungere in modo da ridurre il rischio.

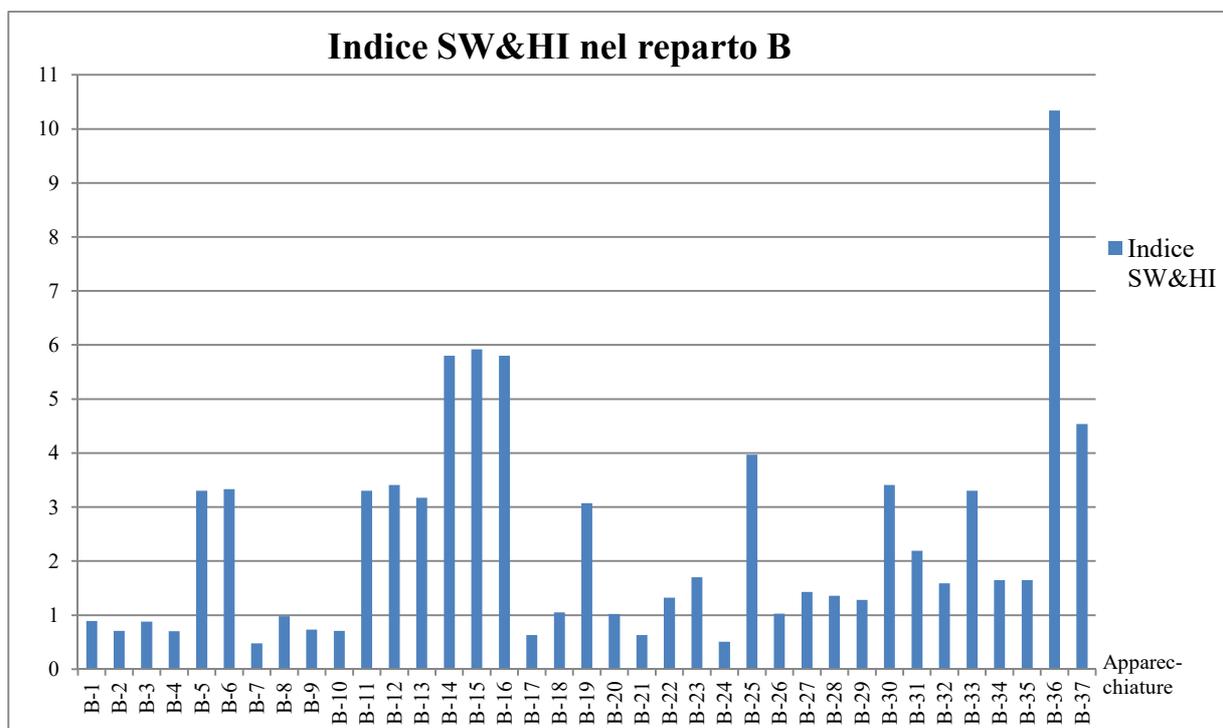
Di conseguenza, se un eventuale rilascio causasse un danno moderato al 50% di apparecchiature e di persone presenti in un'area maggiore di 5 m di raggio, allora tale apparecchiatura sarebbe da considerarsi a rischio e si dovrebbe considerare una soluzione impiantistica alternativa per ridurre l'indice.

Nel reparto A, nessuna apparecchiatura analizzata ha un indice SW&HI maggiore di 5, quindi il reparto opera in sicurezza e non è necessario proporre alcuna soluzione impiantistica (Figura 5.5).

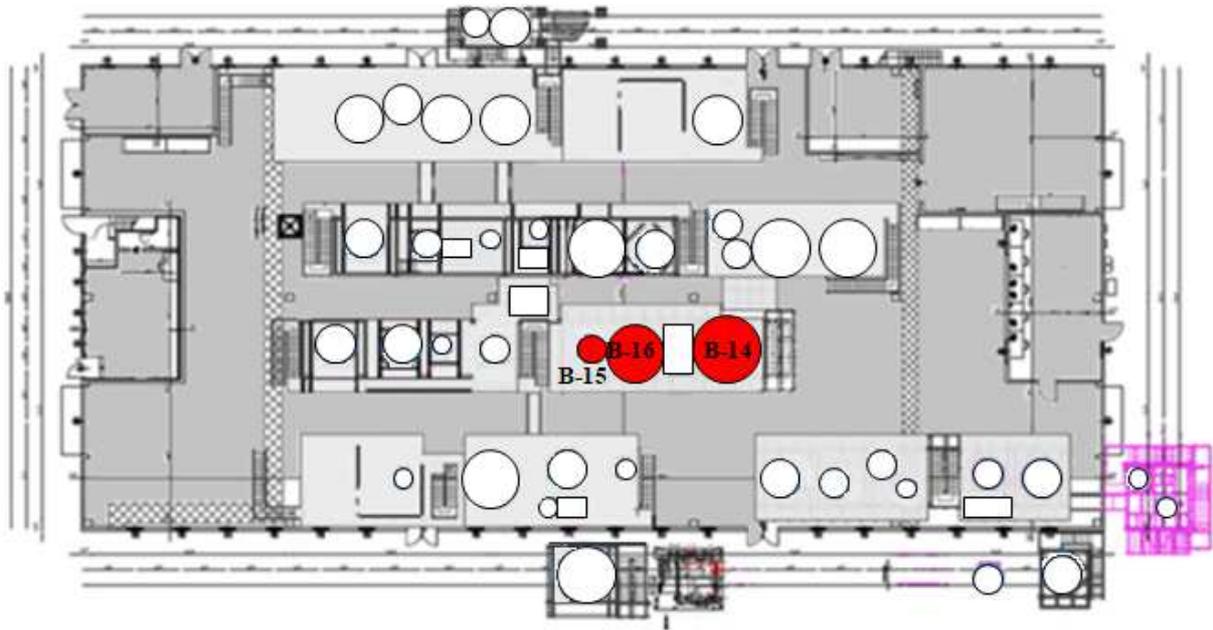


**Figura 5.5:** Valore dell'indice SW&HI per le apparecchiature contenenti sostanze pericolose nel reparto A.

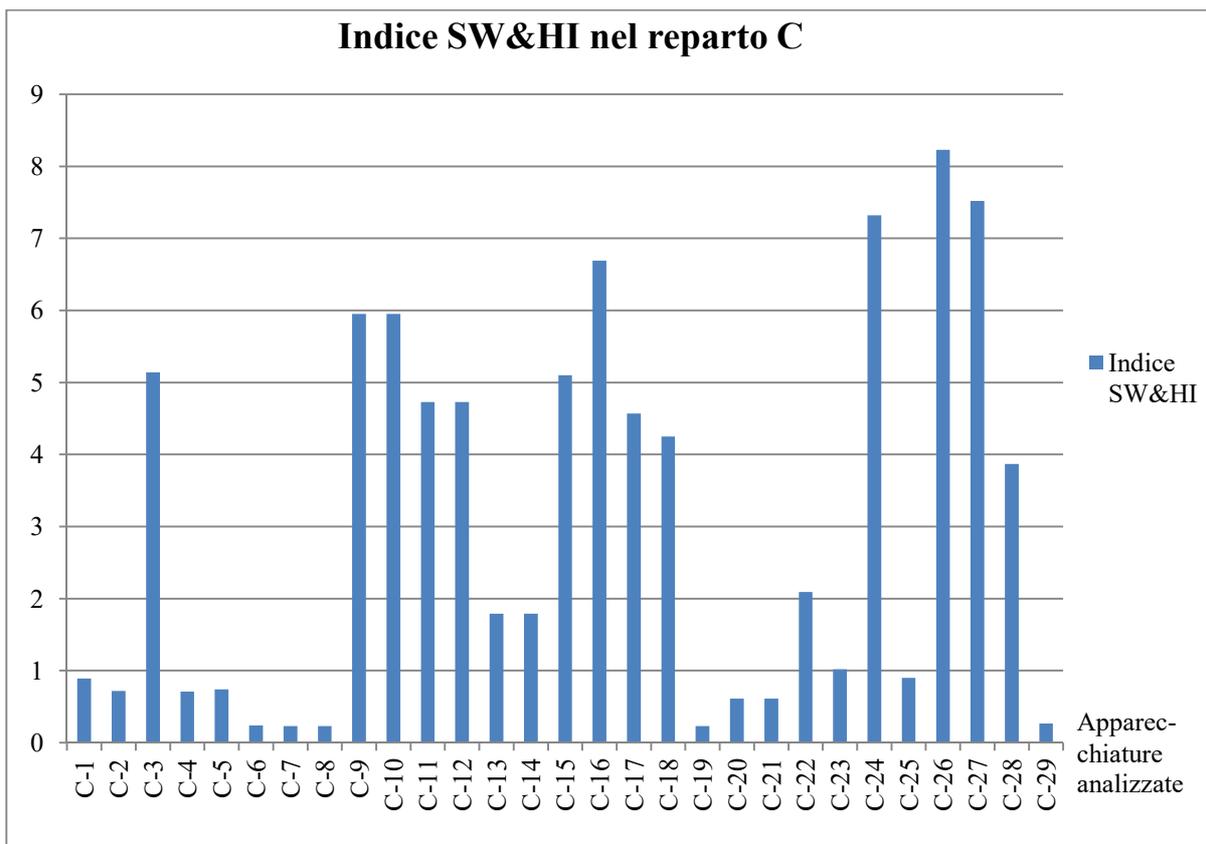
Nei reparti B e C alcune apparecchiature (evidenziate in rosso) hanno un indice SW&HI maggiore di 5 (Figura 5.6, Figura 5.7, Figura 5.8 e Figura 5.9).



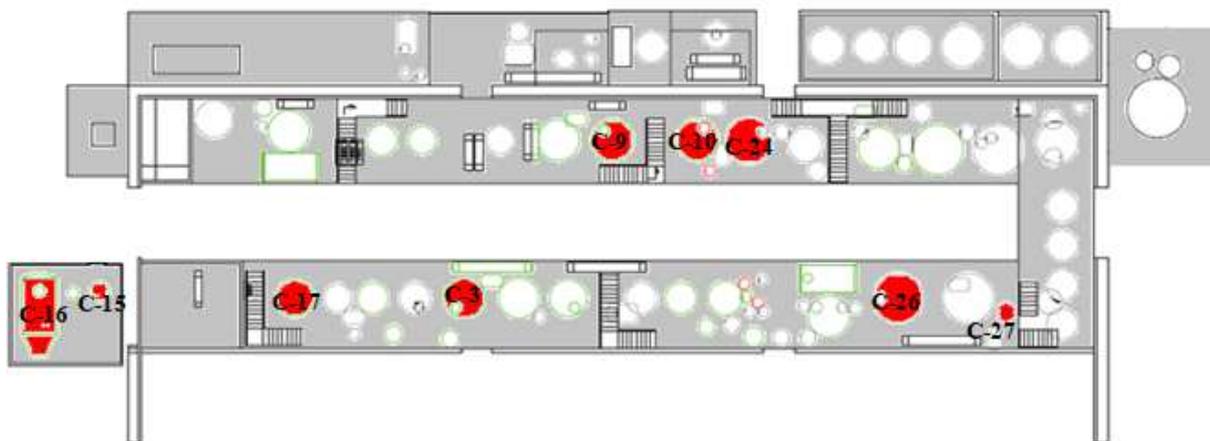
**Figura 5.6:** Valore dell'indice SW&HI per le apparecchiature contenenti sostanze pericolose nel reparto B.



**Figura 5.7:** Mappa delle apparecchiature contenenti sostanze infiammabili nel reparto B con evidenziate in rosso le apparecchiature con indice SW&HI maggiore di 5.



**Figura 5.8:** Valore dell'indice SW&HI per le apparecchiature contenenti sostanze pericolose nel reparto C.

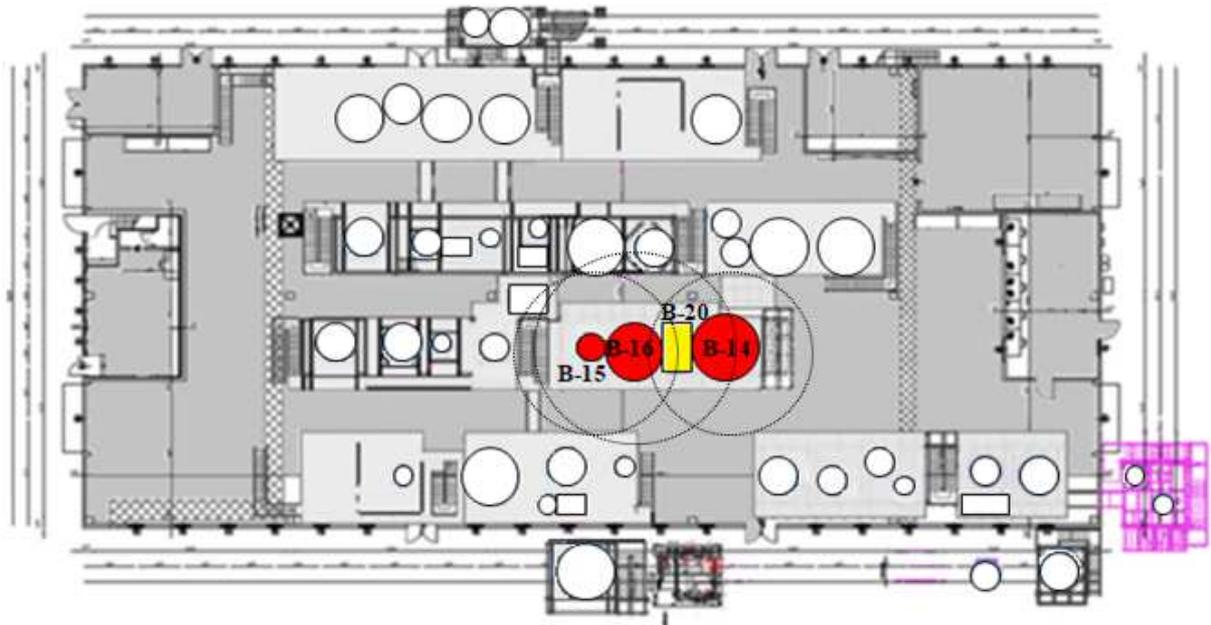


**Figura 5.9:** Mappa del reparto C nella quale si evidenziano in rosso le apparecchiature con indice SW&HI maggiore di 5.

Nel reparto B ci sono tre apparecchiature con indice SW&HI poco superiore a 5 (identificate con B-14, B-15 e B16) e un'apparecchiatura con indice SW&HI molto maggiore di 5 (la B-36), la quale è collocata in un apposito spazio vicino al secondo reparto analizzato. Tutte queste apparecchiature lavorano in sottovuoto abbastanza spinto (15 kPa) e con un elevato quantitativo di n-eptano (le prime tre con circa 6 tonnellate, l'ultima con 30 tonnellate). Nel reparto C, le apparecchiature aventi un indice SW&HI maggiore di 5 sono otto: C-3, C-9, C-10, C-15, C-16, C-24, C-26 e C27. Le prime quattro hanno un indice SW&HI leggermente superiore a 5 e contengono da 5 a 7,5 tonnellate di n-eptano ad alta temperatura (80-140 °C), mentre le restanti superano il valore soglia dell'indice SW&HI di alcune unità dato che contengono un maggiore quantitativo di n-eptano ad alta temperatura. In base all'apparecchiatura considerata ed al rispettivo indice SW&HI, un eventuale rilascio di sostanza infiammabile e/o esplosiva può coinvolgere diverse apparecchiature limitrofe, quindi è possibile che si sviluppi il così detto "effetto domino" (Tabella 5.2., Figura 5.10, Tabella 5.3. e Figura 5.11).

**Tabella 5.2.** Apparecchiature contenenti da un eventuale rilascio dovuto da un'apparecchiatura avente un indice SW&HI maggiore di 5 nel reparto B.

Rilascio dovuto dall'apparecchiatura	Apparecchiature limitrofi coinvolte	
	SW&HI > 5	SW&HI < 5
B-14	B-16	B-20
B-15	B-16	B-20
B-16	B-14 e B-15	B-20



**Figura 5.10:** Collocazione delle apparecchiature coinvolte da un eventuale rilascio dovuto da un'apparecchiatura avente indice SW&HI maggiore di 5 nel reparto B.

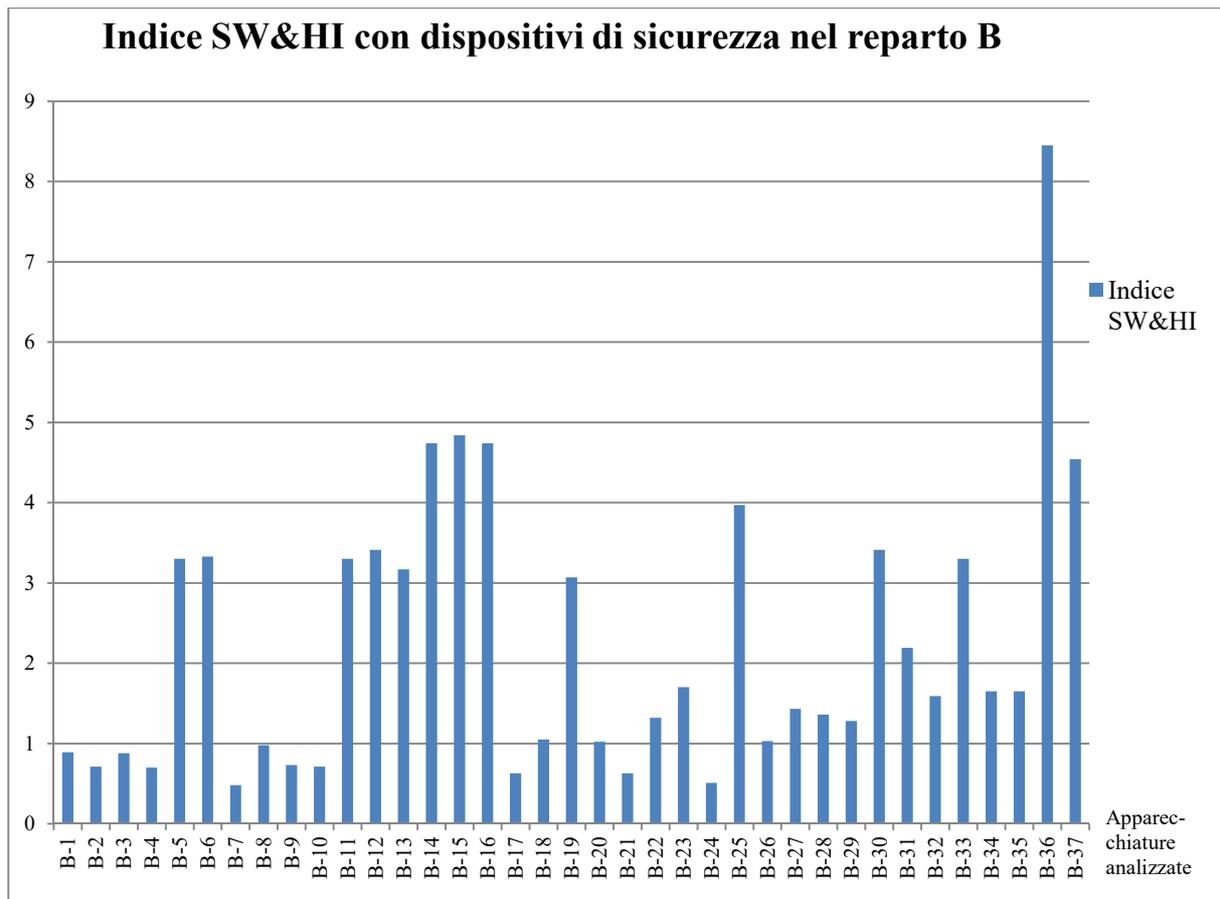
**Tabella 5.3.** Apparecchiature coinvolte da un eventuale rilascio dovuto da un'apparecchiatura avente un indice SW&HI maggiore di 5 nel reparto C.

Rilascio dovuto dall'apparecchiatura	Apparecchiature limitrofi coinvolte		
	Contenenti sostanze infiammabili		Contenenti altre sostanze
	SW&HI > 5	SW&HI < 5	
C-3	-	-	Ca-1 , Ca-2 , Ca-3 , Ca-4 , Ca-5
C-9	-	C-28 e C-29	Ca-6 , Ca-7 e Ca-8
C-10	C-9 e C-24	-	Ca-9 e Ca-10
C-15	C-16	-	Ca-11
C-16	C-15	-	Ca-11
C-17	-	-	Ca-12 , Ca-13 , Ca-14
C-24	C-10	C-2 e C-25	Ca-9 , Ca-10 , Ca-15 e Ca-16
C-26	C-27	C-12 e C-14	Ca-17 e Ca-18
C-27	C-26	-	Ca-19 , Ca-20 , Ca-21 , Ca-22 , Ca-23 , Ca-24 , Ca-25 e Ca-26

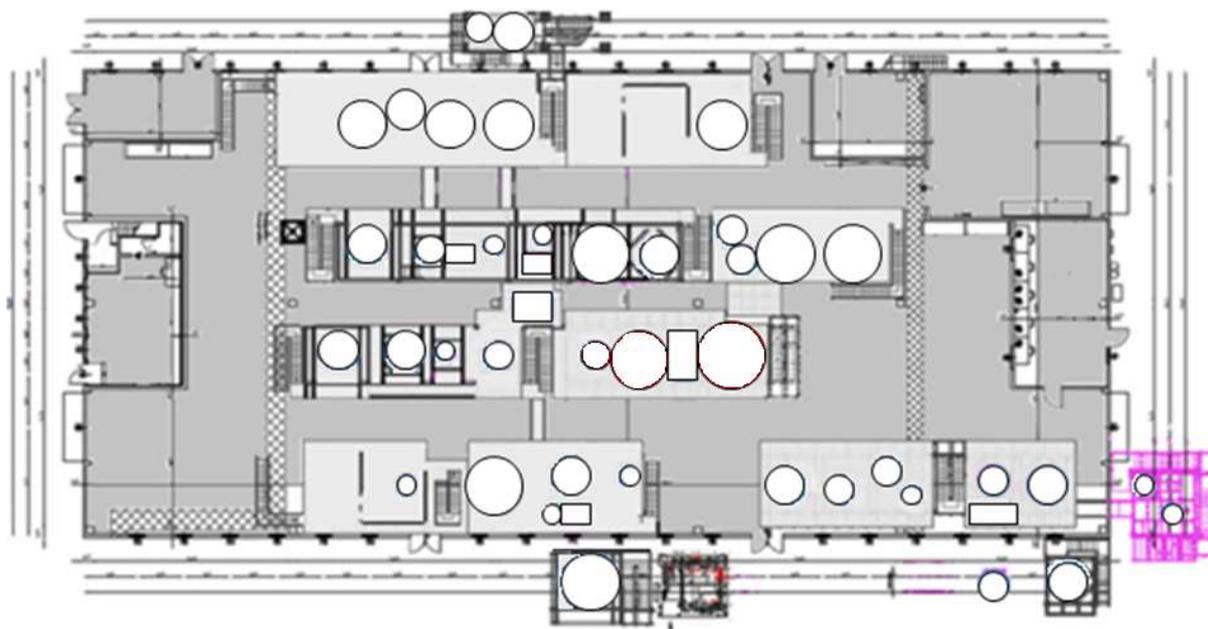


**Figura 5.11:** Collocazione delle apparecchiature coinvolte da un eventuale rilascio dovuto da un'apparecchiatura avente indice SW&HI maggiore di 5 nel reparto C.

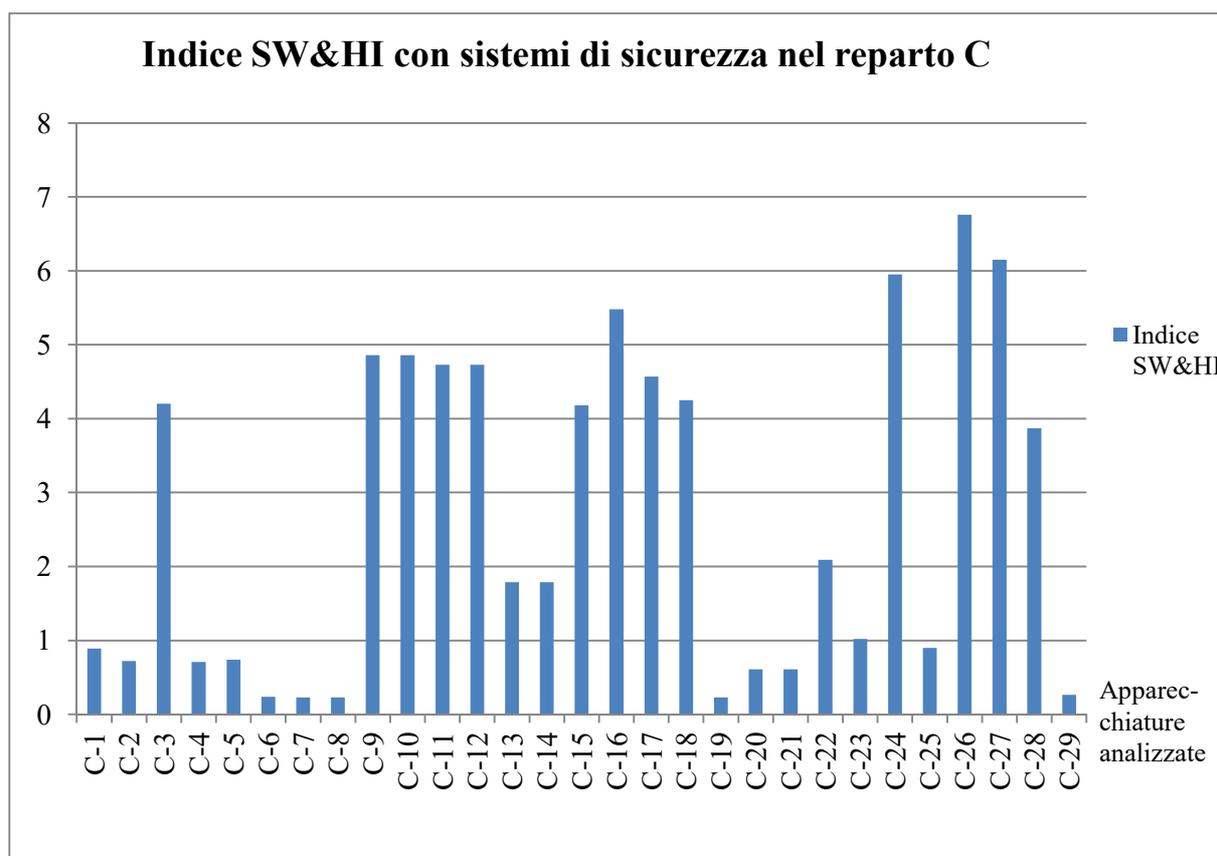
Le apparecchiature evidenziate in rosso hanno un indice SW&HI maggiore di 5, mentre in giallo sono quelle coinvolte da un eventuale rilascio di sostanza infiammabile. Nella maggior parte dei casi, un possibile rilascio coinvolgerebbe almeno un'apparecchiatura avente un indice SW&HI superiore a 5 e contenente un'altra sostanza infiammabile. Per evitare quest'effetto domino, si deve ridurre l'indice SW&HI delle varie apparecchiature identificate come "maggiormente a rischio" aggiungendo dei dispositivi di controllo (di livello o di flusso). In questo modo, nei casi in cui l'indice SW&HI risulta poco superiore a 5, il suo valore numerico diventa inferiore alla soglia di accettabilità del rischio prefissata (**Figura 5.12, Figura 5.13, Figura 5.14, Figura 5.15**).



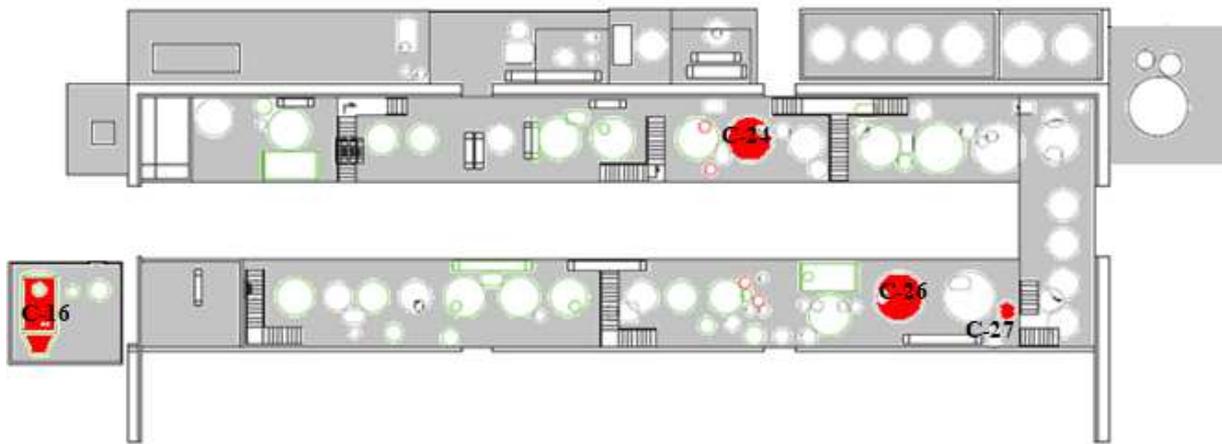
**Figura 5.12:** Valore dell'indice SW&HI, ipotizzando di aggiungere dei dispositivi di controllo per le apparecchiature contenenti sostanze pericolose nel reparto B.



**Figura 5.13:** Mappa del reparto B nella quale si evidenziano in rosso (nessuna) le apparecchiature aventi un indice SW&HI maggiore di 5 anche in seguito all'aggiunta dei dispositivi di controllo.



**Figura 5.14:** Valore dell'indice SW&HI, ipotizzando di aggiungere dei dispositivi di controllo per le apparecchiature contenenti sostanze pericolose nel reparto C.

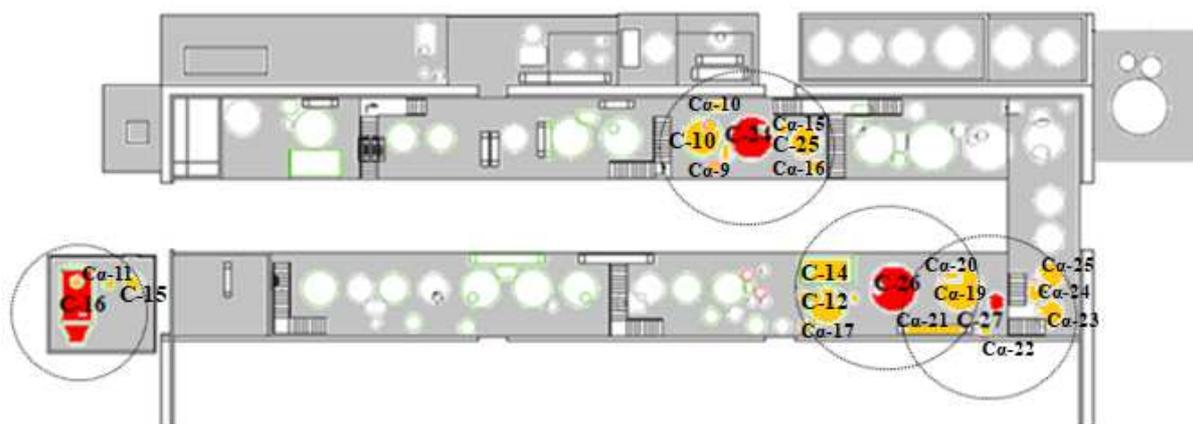


**Figura 5.15:** Mappa del reparto C nella quale si evidenziano in rosso le apparecchiature aventi un indice SW&HI maggiore di 5 anche in seguito all'aggiunta dei dispositivi di controllo.

Aggiungendo gli appositi dispositivi di controllo, nessuna apparecchiatura del reparto B ha un indice SW&HI maggiore di 5, infatti l'apparecchiatura B-36 è collocata in una zona esterna a tale reparto. Nel reparto C ancora quattro apparecchiature hanno un indice maggiore di 5 in quanto esse lavorano con un quantitativo di n-eptano molto elevato (la C-16, la C-24, la C-26 e la C-27). Anche l'effetto domino risulta sensibilmente ridotto: solamente un rilascio dell'apparecchiatura C-27 coinvolgerebbe un'altra apparecchiatura avente un indice SW&HI maggiore di 5 (C-26); in tutti gli altri casi, un eventuale rilascio coinvolgerebbe apparecchiature aventi un indice SW&HI minore di 5 o contenenti sostanze non infiammabili (**Tabella 5.4** e **Figura 5.16**).

**Tabella 5.4:** Apparecchiature contenenti sostanze pericolose coinvolte in un eventuale rilascio dalle apparecchiature limitrofi nel reparto C anche in seguito all'aggiunta dei sistemi di controllo.

Rilascio dovuto dall'apparecchiatura	Apparecchiature limitrofi coinvolte		
	Contenenti sostanze infiammabili		Contenenti altre sostanze
	SW&HI > 5	SW&HI < 5	
C-16	-	C15	Ca-11
C-24	-	C-10 e C-25	Ca-9 , Ca-10 , Ca-15 e Ca-16
C-26	-	C-12 e C-14	Ca-17 , Ca-19 , Ca-20 e Ca-21
C-27	C-26		Ca-19 , Ca-20 , Ca-21 , Ca-22 , Ca-23 , Ca-24 e Ca-25



**Figura 5.16:** Collocazione delle apparecchiature coinvolte da un eventuale rilascio dovuto da un'apparecchiatura avente indice SW&HI maggiore di 5 con l'aggiunta dei dispositivi di controllo nel reparto C.

Dai dati ottenuti dall'azienda, le apparecchiature aventi ancora un indice SW&HI maggiore di 5 nel reparto C vengono utilizzate come serbatoi di stoccaggio o di accumulo intermedio in un processo. Quindi, per diminuire ulteriormente il valore dell'indice, si può proporre all'azienda di ridurre il quantitativo di sostanza infiammabile contenuto all'interno di queste apparecchiature: conseguentemente si ridurrebbe il valore dell'indice SW&HI.

## 6. Studio delle fonti d'innescio

Si è deciso di studiare in maniera più approfondita le fonti d'innescio in quanto, in loro assenza, l'incendio e/o l'esplosione non si sviluppano. Nel D. Lgs. 08/03/2006 [3] sono elencate le fonti d'innescio, mentre nel capitolo 5 della normativa UNI EN 1127-1 2011 [14] si specifica la descrizione di ognuna e le situazioni nelle quali esse possono essere associate ad una realtà industriale (**Tabella 6.1.** ; **Tabella 6.2.**).

**Tabella 6.1.** Descrizione delle fonti d'innescio indicate dal D. Lgs. 08/03/2006.

<b>Fonti d'innescio D. Lgs. 08/03/2006</b>	<b>Descrizione</b>
Superfici calde	Superfici caratterizzate da una temperatura superiore a quella atmosferica
Fiamme, gas, particelle calde	Le fiamme libere sono presenti nei processi in cui è indispensabile l'utilizzo del fuoco (per esempio nei bruciatori); i gas caldi si sviluppano come prodotti di reazione e sono caratterizzati da temperature maggiori di quella ambiente; le particelle calde si generano in particolari processi e hanno una temperatura superiore a quella ambiente
Scintille di origine meccanica	Durante alcuni processi, delle particelle di sostanza pericolosa si possono separare dal materiale solido e diventare calde usando l'energia utilizzata per attuare il processo stesso. Inoltre, se le particelle sono di una sostanza ossidabile, possono sviluppare il processo di ossidazione, aumentando notevolmente la temperatura di processo
Materiali e impianti elettrici	Generano degli archi elettrici che in caso di malfunzionamento possono generare scariche elettriche
Correnti vaganti e protezione catodica	Generate da una dispersione di energia elettrica
Elettricità statica	Formazione di cariche elettriche a causa del moto relativo di un fluido rispetto alla tubazione che lo contiene
Fulmini	Evento naturale che causa l'accumulo di un'elevata quantità di energia elettrica che, se impatta a terra, può variare il voltaggio delle apparecchiature vicine al punto d'impatto
Radio frequenze da $10^4$ Hz a $10^{11}$ Hz	Segnali elettrici emessi da un qualsiasi strumento che genera o utilizza energia elettrica a radio frequenza
Onde elettromagnetiche da $3 \cdot 10^{11}$ Hz a $3 \cdot 10^{15}$ Hz	Radiazioni di energia in un campo elettromagnetico che possono essere assorbite da un'atmosfera infiammabile e/o esplosiva o da una superficie solida, o da una polvere, se la sorgente luminosa è molto intensa
Radiazioni ionizzanti	Generate dai tubi a raggi X o da sostanze radioattive: possono causare decomposizione chimica o altre reazioni che sviluppano alta reattività radicalica o composti chimici instabili
Ultrasuoni	Onde meccaniche sonore che, a causa della loro elevata frequenza, non sono udibili dall'orecchio umano e sono generati da particolari tipi di apparecchiature

<b>Fonti d'innescio D. Lgs. 08/03/2006</b>	<b>Descrizione</b>
Compressione adiabatica e onde d'urto	La compressione adiabatica consiste in un repentino aumento della pressione che causa un brusco incremento della temperatura; le onde d'urto sono delle onde acustiche impercettibili, ad alta intensità e contengono un'elevatissima quantità di energia
Reazioni esotermiche	Una reazione è un qualsiasi processo che converte una sostanza (reagente) in un'altra (prodotto) ed è esotermica se durante tale trasformazione il calore viene ceduto dal sistema all'ambiente circostante

**Tabella 6.2.** Associazione delle fonti d'innescio del D. Lgs. 08/03/2006 a delle realtà industriali.

<b>Fonti d'innescio D. Lgs. 08/03/2006</b>	<b>Realtà industriale associata</b>
Superfici calde	Possono sviluppare un incendio o un'esplosione se entrano in contatto con un'atmosfera infiammabile/esplosiva, con uno strato di polvere o di solido combustibile
Fiamme, gas, particelle calde	Le fiamme si possono sviluppare in una reazione di combustione in cui la temperatura è maggiore di 1000 °C; i gas caldi possono essere ottenuti come prodotti di reazione; le particelle calde si possono generare da lavorazioni a caldo, come la saldatura
Scintille di origine meccanica	Si sviluppano durante processi di frizione, impatto o abrasione, come la macinazione. Possono innescare gas o vapori combustibili e miscele di polveri o aria
Materiali e impianti elettrici	Si sviluppano quando un circuito elettrico è aperto o chiuso, da una perdita di connettori, da una corrente dispersa, quindi in presenza di apparati elettrici
Correnti vaganti e protezione catodica	Possono derivare da sistemi elettricamente conduttivi o da parti di essi come, per esempio, il ritorno della corrente in un sistema di generazione di potenziale, o come risultato di un corto circuito, di induzione magnetica o di un fulmine
Elettricità statica	Può essere generata durante lo scarico della carica o di una sostanza trasportata all'interno di un materiale non conduttivo, oppure se si isola una parete conduttiva
Fulmini	Caduta di un fulmine all'interno o in prossimità dell'azienda
Radio frequenze da 10 <sup>4</sup> Hz a 10 <sup>11</sup> Hz	Utilizzo di radio trasmettitori, di generatori industriali o medici
Onde elettromagnetiche da 3*10 <sup>11</sup> Hz a 3*10 <sup>15</sup> Hz	Possono essere generati dalla riflessione dei raggi solari ad opera di superfici riflettenti o con radiazioni laser o in presenza di polvere se la fonte di illuminazione è molto intensa
Radiazioni ionizzanti	Generate dai tubi a raggi X o da sostanze radioattive che possono innescare un'atmosfera infiammabile e/o esplosiva a causa dell'assorbimento di energia.
Ultrasuoni	Presenti se ci sono dei trasduttori elettroacustici: emettono un elevato quantitativo di energia che può essere assorbito da sostanze solide o liquide

<b>Fonti d'innesco D. Lgs. 08/03/2006</b>	<b>Realtà industriale associata</b>
Compressione adiabatica e onde d'urto	Possono essere generate da un'improvvisa ventilazione nei tubi ad alta pressione di vapore e possono essere riflesse dalle superfici delle apparecchiature
Reazioni esotermiche	In processi in cui le apparecchiature operano a temperature molto elevate e/o a particolari valori di rapporto volume/superficie e/o coinvolgono sostanze piroforiche

Identificate le fonti d'innesco, si deve capire in quali circostanze esse siano efficaci, ossia in quali situazioni sviluppano uno scenario incidentale (**Tabella 6.3.**).

**Tabella 6.3.** Efficacia delle fonti d'innesco.

<b>Fonti d'innesco identificate</b>	<b>Efficacia</b>	<b>Riferimento</b>
Superfici calde	Efficaci se la temperatura della superficie calda è superiore alla temperatura di autoaccensione della sostanza pericolosa	[15]
Fiamme libere	Sempre efficaci, dato che una fiamma libera raggiunge sempre temperature molto elevate (>1000°C)	[15]
Gas caldi	Efficaci quando la temperatura di un gas caldo è superiore alla temperatura di autoaccensione della sostanza pericolosa	[15]
Particelle calde	Efficaci se la temperatura delle particelle calde è superiore alla temperatura di autoaccensione della sostanza pericolosa	[15]
Scintille di origine meccanica	Efficaci se la temperatura delle particelle calde è superiore alla temperatura di autoaccensione della sostanza	[16]
Materiali elettrici ed impianti elettrici	Sempre efficaci, dato che una tensione molto bassa, come 50 V, può produrre un'energia sufficiente per accendere un'atmosfera esplosiva	[15]
Correnti vaganti e protezione catodica	Sempre efficaci, dato che anche una lieve differenza di potenziale può causare un'accensione di una dispersione di sostanza pericolosa	[15]
Elettricità statica	Sempre efficaci se non vi è un'apposita messa a terra o se essa non funzionasse correttamente: gran parte di gas e vapori infiammabili hanno un'energia di accensione minore di 0,2 mJ mentre per le polveri può essere inferiore a 10mJ	[17]
Fulmini	Sempre efficaci, dato che trasportano un elevato quantitativo di energia (normalmente circa 5 Coulomb, ma quelli più violenti possono raggiungere fino a 30 Coulomb)	[18] [15]
Onde elettromagnetiche e radio frequenze da 10 <sup>4</sup> Hz a 10 <sup>11</sup> Hz	Efficaci come definito da [19]	[19]

Fonti d'innesco identificate	Efficacia	Riferimento
Radiazioni ionizzanti	Efficaci quando una sostanza pericolosa dispersa in atmosfera assorbe dalle radiazioni ionizzanti un'energia maggiore del calore di combustione della sostanza stessa	[15]
Ultrasuoni	Efficaci se l'energia emessa da un trasduttore elettroacustico, ed in seguito assorbita da una sostanza pericolosa dispersa, è maggiore del calore di combustione della stessa sostanza pericolosa dispersa	[15]
Compressione adiabatica e onde d'urto	Efficaci in base alla temperatura raggiunta a causa della compressione: se è maggiore della temperatura di autoaccensione della sostanza pericolosa, allora tale fonte d'innesco è da considerare efficace	[15]
Reazioni esotermiche	Efficaci quando la temperatura raggiunta a causa della velocità di generazione di calore è maggiore della temperatura di autoaccensione della sostanza pericolosa	[15]

Le onde elettromagnetiche generano dei campi elettromagnetici che possono causare l'innesco di una nube di sostanza pericolosa. I campi elettromagnetici si sviluppano quando si utilizza l'elettricità ma, nella maggior parte dei casi, la loro intensità è molto debole e non sono da considerare come fonti d'innesco efficaci (Capitolo 1 [19]). Per determinare se le onde elettromagnetiche e le radio frequenze sono da considerare come fonti d'innesco efficaci si consulta la tabella 3.2 del documento [19].

La compressione adiabatica e le onde d'urto provocano una riduzione di volume che generano un incremento della temperatura [15]. L'aumento della temperatura è valutabile tramite l'equazione di Poisson [15]:

$$T_2 = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{k-1} * T_1 \quad (6.1)$$

In cui:

- $V_1$  è il volume prima della compressione;
- $V_2$  è il volume dopo la compressione;
- $k$  è il rapporto dei calori specifici del gas in compressione;
- $T_1$  è la temperatura prima della compressione;
- $T_2$  è la temperatura dopo la compressione.

Durante le reazioni esotermiche la velocità di generazione del calore può diventare maggiore della velocità di dissipazione del calore verso l'esterno [15]. Ciò provoca un aumento della temperatura calcolabile con un bilancio termico.

Non è stato possibile quantificare un valore numerico oltre al quale considerare una fonte d'innesco efficace in quanto la loro efficacia dipende sia dalle caratteristiche chimiche della sostanza rilasciata accidentalmente in atmosfera, sia dalle condizioni operative delle apparecchiature limitrofe. Infatti, se l'apparecchiatura A-1 rilasciasse una sostanza infiammabile e/o esplosiva, la nube si potrebbe estendere fino alle apparecchiature A-2 e A-3. Se le superfici delle apparecchiature A-2 e A-3 avessero una temperatura maggiore della temperatura di autoaccensione della sostanza rilasciata da A-1 sarebbero da considerare come delle superfici calde efficaci.

Per ogni fonte d'innesco efficace, si valuta la probabilità con la quale essa sviluppa un incendio e/o un'esplosione. Abbiamo analizzato il documento di Taylor [6] che adatta l'equazione della probabilità di non innesco di un rilascio in un impianto offshore ad impianti petrolchimici e all'industria chimica. L'equazione modificata da Taylor è applicabile se si verificano contemporaneamente le seguenti condizioni: le fonti d'innesco sono equamente distribuite all'interno di un'area, la probabilità di presenza di una fonte d'innesco è indipendente dalla probabilità di rilascio di un gas. Per ogni fonte d'innesco efficace è stata calcolata la probabilità di non innesco di un rilascio,  $\ln Q(t)$ , [6]:

$$\ln Q(t) = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J A_{ih} * \mu_j * [(1 - a_j p_j) * e^{-\lambda_j p_j d_i} - 1] \quad (6.2)$$

In cui:

- $t$  è il tempo di persistenza di una nube infiammabile;
- $A_{ih}$  è l'area della  $i$ -esima regione di tutto il sito;
- $\mu_j$  è la densità della  $j$ -esima fonte di innesco all'interno dell'area;
- $a$  è la probabilità che una fonte d'innesco sia inizialmente attiva;
- $p_j$  è il potenziale di innesco (probabilità di innesco) della  $j$ -esima fonte nell'area  $i$
- $\lambda_i$  è la frequenza di attivazione della  $j$ -esima fonte;
- $d_i$  è il periodo di tempo in cui la  $j$ -esima fonte di innesco entra in contatto con la nuvola di gas infiammabile;
- $t_i$  è il periodo medio tra le attivazioni della fonte;
- $t_a$  è il periodo medio di attivazione della fonte.

Poiché spesso è complicato quantificare il parametro  $d_i$ , si considera il caso peggiore nel quale è pari a  $t_a$ . Noti i parametri  $t_i$  e  $t_a$ , si calcolano i valori di  $\lambda_i$  e di  $a$ :

$$\lambda_i = \frac{1}{t_a + t_i} \quad (6.3)$$

$$a = \frac{t_a}{t_a + t_i} \quad (6.4)$$

Il documento di Taylor [6] fornisce anche i valori dei parametri presenti nella formula (6.2). Questi valori dipendono comunque dalla realtà industriale considerata e anche dal tipo di controllo che si effettua sulla fonte d'innesco e dalla sua collocazione.

Per una fonte d'innesco continua, ossia sempre attiva, come per esempio un impianto elettrico di illuminazione,  $t_i = 0$ ,  $a = 1$ ,  $\lambda = \infty$  [6], la probabilità di non innesco è calcolabile con il prodotto tra l'area della  $i$ -esima regione del sito e la densità della  $j$ -esima fonte d'innesco presente in quell'area. Nel caso specifico di fonte continua, l'equazione (6.2) si semplifica molto. Per le fonti d'innesco discontinue, ossia non costantemente attive, come per esempio un motore elettrico con funzionamento intermittente, l'analista deve valutare la densità della fonte d'innesco, il tempo medio di attivazione della fonte  $t_a$  e il tempo medio tra due intervalli di attivazione  $t_i$ , in modo da poter calcolare  $\lambda$  ed  $a$ . Successivamente, si inseriscono tali valori nella relazione (6.2) e si determina la probabilità di non innesco al tempo  $t$ .

Per valutare la probabilità di non innesco dovuta ad un fulmine che cade in prossimità di un impianto, si è deciso di usare una formula differente dalla (6.2), dato che risulta impossibile valutare i parametri che costituiscono quell'equazione:

$$\ln Q(t) = 1 - \frac{\lambda}{\mu + \lambda} * [1 - e^{-(\mu + \lambda) * t}] \quad (6.5)$$

In cui:

- $\lambda$  è la frequenza di caduta di un fulmine in una zona
- $\mu$  è l'inverso del tempo di attivazione

La frequenza di caduta di un fulmine in una zona è valutabile analizzando l'archivio di fulminazione della zona stessa.

Di seguito, si sono correlate le diverse tipologie di fonti di innesco identificate dal D. Lgs. del 2006 [3] a quelle presenti in letteratura [6] (**Tabella 6.4.**).

**Tabella 6.4.** Correlazione delle fonti d'innesco del decreto legislativo con quelle del documento.

<b>Fonti di innesco del D. Lgs. 08/03/2006</b>	<b>Fonti di innesco del documento di Taylor</b>
Superfici calde	Riscaldatore elettrico
	Rivestimento isolante
	Traccia di calore elettrico
	Tubi caldi o flange calde
	Fonditore
	Essiccatore
Fiamme libere	Fiamme libere continue all'aperto
	Fiamme libere continue al chiuso
	Fiamme libere infrequenti all'aperto
	Fiamme libere infrequenti al chiuso
	Fiamme libere intermittenti all'aperto
	Fiamme libere intermittenti al chiuso
	Torcia a terra
	Torcia a camino
Gas caldi	Rilascio turbina a gas
	Fornace industriale
	Caldaia
Particelle calde	Saldatura durante funzionamento del processo
	Lavori a caldo durante funzionamento del processo
Scintille di origine meccanica	Nastri trasportatori
	Coclea
	Frantoio
	Montacarichi
	Recuperatore
	Carrello elevatore
Materiali elettrici e impianti elettrici	Impianti di illuminazione
	Cablaggi e messe a terra
	Avvio della pompa
	Pompe, motori, interruttori, trasmettitore
	Valvole motorizzate, strumentazione
	Raffreddatori con ventola
Correnti vaganti e protezione catodica	-
Elettricità statica	Trasporto di fluidi e di solidi

Fonti di innesco del D. Lgs. 08/03/2006	Fonti di innesco del documento di Taylor
Fulmini	-
Radio frequenze da $10^4$ Hz a $10^{11}$ Hz	-
Radiazioni ionizzanti	-
Ultrasuoni	-
Compressione adiabatica e onde d'urto	-
Reazioni esotermiche	-

Per alcune fonti d'innesco presenti nel D. Lgs. del 2006 [3], come per esempio le correnti vaganti e la protezione catodica e i fulmini, non è stato possibile trovare una corrispondenza con le fonti d'innesco presenti in letteratura [6]. È stato notato che alcune fonti d'innesco sono associabili alla presenza di particolari tipi di macchinari: se in un sito industriale non ci fossero apparecchiature che generano tali fonti d'innesco, come per esempio le radiazioni ionizzanti, allora queste fonti d'innesco sarebbero da considerate non efficaci. Invece, se nel sito ci fossero delle apparecchiature che generano tali fonti d'innesco, l'analista dovrebbe valutarne l'efficacia (**Tabella 6.3**). Il mantenimento di questi particolari macchinari deve seguire le istruzioni di manutenzione del costruttore in modo da essere sempre in buone condizioni. Se tali apparecchiature, correttamente funzionanti, venissero identificate come fonti d'innesco efficaci, allora l'analista le dovrebbe considerare come fonti d'innesco discontinue, valutando la densità della fonte d'innesco, il tempo medio di attivazione della fonte ( $t_a$ ) e il tempo medio tra due intervalli di attivazione ( $t_i$ ), in modo da calcolare  $\lambda$  ed  $a$ . Inoltre, nel caso in cui l'analista individua altre possibili fonti d'innesco differenti da quelle riportate nel D. Lgs. 2006, deve comunque determinare l'efficacia di queste fonti d'innesco e, eventualmente, quantificare anche la probabilità di non innesco (**Tabella 6.5**).

**Tabella 6.5.** Fonti d'innesco presenti nel documento di Taylor [6] ma non associabili a fonti d'innesco del D. Lgs. 08/03/2006.

Fonti di innesco assenti nel D. Lgs.	p	$t_a$ hr	$t_i$ hr	a	$\lambda$ yr <sup>-1</sup>	$\mu$ m <sup>-2</sup>
Camminata operatore	0,01	0,5	4	0,1111	2190	$3 \cdot 10^{-4}$
Campionamento operatore	0,01	0,25	8	0,0303	1095	$3 \cdot 10^{-4}$
Turbine a vapore	0,004	-	-	1	$\infty$	-
Turbine a gas (chiuse)	0,02	-	-	1	$\infty$	-
Caricamento rack	0,001	2	28	0,067	$\infty$	-
Rigeneratore glicole anticendio	1	-	-	1	$\infty$	-

### 6.1 Quantificazione dei parametri dell'equazione della probabilità di non innesco

Per determinare la probabilità di non innesco di una fonte d'innesco si utilizza l'equazione modificata da Taylor [6]:

$$\ln Q(t) = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J A_{ih} * \mu_j * [(1 - a_j p_j) * e^{-\lambda_j p_j t} - 1] \quad (6.2)$$

L'area della regione considerata del sito ( $A_{ih}$ ) è valutabile dalle planimetrie del reparto analizzato. La densità di una fonte d'innesco nell'area ( $\mu_j$ ) si calcola come rapporto tra il numero di fonti d'innesco efficaci di quel tipo e l'area della regione considerata del

sito. Per esempio, dalla planimetria del reparto A si ottiene un'area pari a 2000 m<sup>2</sup> e, in tale area, sono state identificate 75 possibili superfici calde efficaci durante il tempo di produzione di tale linea: la densità della fonte d'innesco "superfici calde" nella linea di produzione A è pari ad 0,0375 (75 superfici calde efficaci identificate su 2000 m<sup>2</sup>). I valori del potenziale di innesco di una fonte ( $p_j$ ) e dell'arco di tempo in cui una fonte d'innesco entra in contatto con una nube di sostanza infiammabile ( $d_i$ ) sono riconducibili al documento di Taylor [6]. Nel caso in cui il parametro  $d_i$  non fosse noto allora lo si può considerare pari al periodo medio di attivazione di una fonte ( $t_a$ ). La probabilità che una fonte d'innesco sia inizialmente attiva ( $a$ ) e la frequenza di attivazione di una fonte d'innesco ( $\lambda_j$ ) dipendono dai parametri  $t_i$  (periodo medio tra due attivazioni di una stessa fonte) e  $t_a$  [6].

Per valutare i parametri  $t_i$  e  $t_a$  deve essere noto come si evolve il processo di produzione nel tempo (Tabella 6.6).

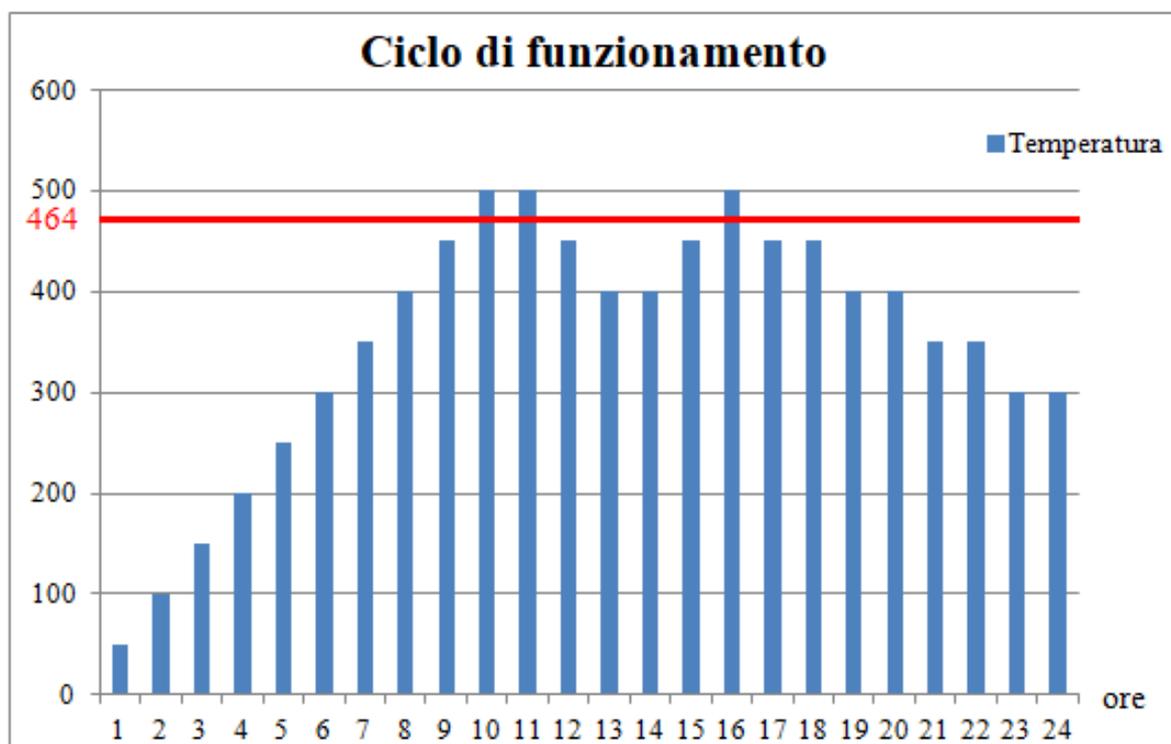
**Tabella 6.6.** Determinazione dei valori dei parametri  $t_a$  e  $t_i$ .

Fonti d'innesco D. Lgs. 08/03/2006	Come quantificare $t_a$	Come quantificare $t_i$
Superfici calde	Arco di tempo in cui una superficie calda risulta efficace in un ciclo	Arco di tempo in cui una superficie calda non risulta efficace in un ciclo
Fiamme libere	Arco di tempo in cui un processo opera in presenza di fiamma (per esempio il tempo di lavoro di un bruciatore)	Arco di tempo in cui le fiamme non sono presenti nel processo (per esempio il tempo in cui il bruciatore è spento)
Gas caldi	Arco di tempo in cui un gas caldo risulta efficace in un ciclo	Arco di tempo in cui un gas caldo non risulta efficace in un ciclo
Particelle calde	Arco di tempo in cui delle particelle calde efficaci sono presente in un ciclo	Arco di tempo in cui non sono presenti delle particelle calde in un ciclo
Scintille meccaniche	Arco di tempo in cui delle particelle calde efficaci sono presente in un ciclo	Arco di tempo in cui non sono presenti delle particelle calde in un ciclo
Materiali ed impianti elettrici	Arco di tempo in cui un processo opera in presenza di materiali elettrici	Arco di tempo in cui un processo opera in assenza di materiali elettrici
Correnti vaganti e protezione catodica	Arco di tempo in cui si presenta un corto circuito o un mal funzionamento di una messa a terra	Arco di tempo in cui il circuito o la messa a terra funzionano correttamente
Elettricità statica	Arco di tempo in cui la messa a terra non è correttamente funzionante	Arco di tempo in cui la messa a terra è correttamente funzionante
Fulmini	Non è necessario valutare tale parametro in quanto si usa una formula differente dall'equazione (6.2)	Non è necessario valutare tale parametro in quanto si usa una formula differente dall'equazione (6.2)
Onde elettromagnetiche da $3 \cdot 10^{11}$ Hz a $3 \cdot 10^{15}$ Hz e radio frequenze da $10^4$ Hz a $10^{11}$ Hz	Arco di tempo in cui l'apparecchiatura che genera tali frequenze non funziona correttamente	Arco di tempo in cui l'apparecchiatura che genera tali frequenze funziona correttamente

Fonti d'innescio D. Lgs. 08/03/2006	Come quantificare $t_a$	Come quantificare $t_i$
Radiazioni ionizzanti	Arco di tempo in cui le radiazioni ionizzanti trasmettono un'energia maggiore del calore di combustione di una sostanza	Arco di tempo in cui le radiazioni ionizzanti trasmettono un'energia minore del calore di combustione di una sostanza
Ultrasuoni	Arco di tempo in cui gli ultrasuoni sono delle fonti d'innescio efficaci	Arco di tempo in cui gli ultrasuoni non sono delle fonti d'innescio efficaci
Compressione adiabatica e onde d'urto	Arco di tempo in cui la compressione genera una temperatura maggiore della temperatura di autoaccensione di una sostanza dispersa	Arco di tempo in cui la compressione genera una temperatura minore della temperatura di autoaccensione di una sostanza dispersa
Reazioni esotermiche	Arco di tempo in cui la temperatura di reazione risulta maggiore della temperatura di autoaccensione di una sostanza dispersa	Arco di tempo che in cui la temperatura di reazione è minore della temperatura di autoaccensione di una sostanza dispersa

#### 6.1.1. Superfici calde, gas caldi e particelle calde

Per le superfici calde, i gas caldi e le particelle calde, è possibile determinare i valori di  $t_a$  e  $t_i$  in base al concetto di efficienza. In una linea di produzione un'apparecchiatura può operare in un determinato intervallo di temperatura. Le superfici di tale apparecchiatura diventano fonti d'innescio efficaci solo nell'arco di tempo in cui la loro temperatura è maggiore della temperatura di autoaccensione di una nube di sostanza pericolosa dispersa accidentalmente nell'ambiente; mentre per il restante periodo di funzionamento del processo tali fonti d'innescio risultano non efficaci. Se, per esempio, si ipotizza che sia avvenuto un rilascio di metanolo, il quale ha una temperatura di autoaccensione pari a 464°C, allora la superficie di un apparecchiatura risulta una fonte d'innescio efficace solo nell'arco di tempo in cui l'apparecchiatura lavora a temperatura maggiore di 464°C, mentre per il restante periodo risulta non efficace. Ipotizzando che l'apparecchiatura operi a temperatura maggiore di 464°C per 3 ore consecutive e che l'intero processo batch duri 24 ore, allora il periodo medio di attivazione ( $t_a$ ) è pari a 3 ore, mentre il periodo medio tra due attivazioni ( $t_i$ ) è pari a 21 ore (differenza tra la durata totale del processo e il periodo in cui la fonte risulta attiva). Invece, se l'apparecchiatura avesse un ciclo termico più complesso (**Figura 6.1**), per essere cautelativi, si considera  $t_a$  pari al periodo maggiore di efficienza della fonte d'innescio in un ciclo (in questo caso 2 ore, dalle 10 alle 12 ore dall'inizio del ciclo) e  $t_i$  pari al periodo minore tra due attivazioni della fonte d'innescio considerata (in questo caso è uguale a 4 ore, dalle 12 alle 16 ore dall'inizio del ciclo).



**Figura 6.1:** Rappresentazione del ciclo termico del processo ipotizzato.

Nel caso in cui si ipotizzasse una dispersione di n-eptano e non di metanolo, poiché la temperatura di autoaccensione del n-eptano è pari a 223°C, il parametro  $t_a$  risulterà maggiore rispetto a quello valutato per la dispersione di metanolo, dato che la temperatura di autoaccensione del n-eptano è minore, mentre  $t_i$  risulterà minore. Quindi  $t_a$  e  $t_i$  sono influenzati sia dal rilascio di sostanza identificato, sia dal ciclo di funzionamento dell'apparecchiatura. Analogamente, si può utilizzare lo stesso criterio anche per i gas caldi e le particelle calde: in questi casi, ci si può ricondurre al primo esempio descritto per le superfici calde, nel quale la fonte d'innesco è efficace per un arco di tempo continuo pari all'intervallo di tempo in cui si registra la presenza di una fuoriuscita di gas caldo o una generazione di particelle calde in seguito a particolari attività lavorative (per esempio la saldatura).

### 6.1.2. Fiamme libere

Essendo le fiamme libere sempre efficaci quando sono presenti, i parametri  $t_a$  e  $t_i$  sono da riferire alla presenza effettiva della fiamma nel processo. Le fiamme possono svilupparsi in presenza di alcune apparecchiature (come i bruciatori) [15] o a causa di particolari azioni che vengono compiute nel processo (per esempio dalle torce a camino) (**Tabella 6.3**). Nel caso in cui siano presenti dei bruciatori, il periodo medio di attivazione ( $t_a$ ) coincide con l'arco di tempo in cui le fiamme sono presenti nel bruciatore. Il periodo medio tra due attivazioni ( $t_i$ ) è l'arco di tempo che trascorre tra due cicli del singolo bruciatore (tra quando esso si spegne alla successiva riaccensione). Per esempio, si ipotizza che un processo batch venga interamente sviluppato in 24 ore e che al suo interno ci sia un bruciatore che viene attivato una sola volta per ogni batch e le fiamme sono presenti al suo interno per 5 ore, allora  $t_a$  risulta pari a 5 ore e  $t_i$  a 19 ore (differenza tra la durata del processo, 24 ore, e la presenza delle fiamme nel bruciatore 5 ore). Se, invece, il bruciatore fosse attivato più volte all'interno di un ciclo (**Figura 6.2**), allora  $t_a$  risulta pari a 5 ore (arco di tempo maggiore in cui il bruciatore è attivo, quindi pari ad 1), e  $t_i$  è pari a 3 ore (arco di tempo minore in cui il bruciatore non è attivo, quindi pari a 0).

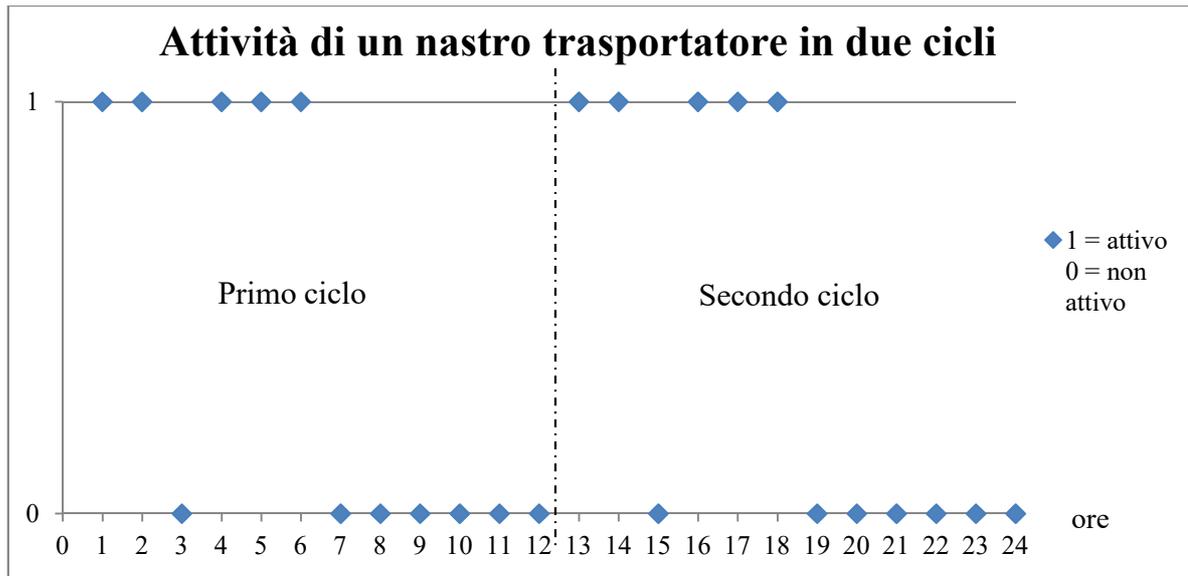


**Figura 6.2:** Rappresentazione dell'attività di un bruciatore in un ciclo ipotizzato.

Quindi, in questo caso il valore di  $t_i$  non dipende dalla durata dell'intero ciclo batch, ma dal ciclo di funzionamento del singolo bruciatore esaminato. Infine, se in un processo fosse previsto un lavoro di saldatura per la manutenzione, il parametro  $t_i$  diventerebbe trascurabile rispetto al parametro  $t_a$ : i due parametri devono essere riferiti al tempo impiegato per la manutenzione e durante il periodo di manutenzione si può presupporre che l'operazione sia continua. Di conseguenza, il tempo impiegato per effettuare la saldatura coincide con  $t_a$  mentre  $t_i$  è pressoché nullo. Quindi, dall'equazione (6.3)  $\lambda$  risulta inversamente proporzionale a  $t_a$ , tempo impiegato dal processo di saldatura, mentre dall'equazione (6.4)  $a$  è pari a 1.

### 6.1.3. Scintille meccaniche

Le scintille meccaniche possono essere generate o da processi di abrasione, attrito o urto, come ad esempio la molatura [15], oppure a causa di un mal funzionamento di un nastro trasportatore o di un carrello elevatore (**Tabella 6.4**). Esse generano delle particelle calde la cui efficienza dipende sia dalla temperatura della particella stessa sia dalla temperatura di autoaccensione della sostanza rilasciata accidentalmente in atmosfera. Per esempio, se le scintille meccaniche generassero delle particelle calde la cui temperatura fosse circa 300°C, tali particelle potrebbero essere una fonte d'innesco efficace (in base anche alla loro dimensione) per una nube di n-esano, la cui temperatura di autoaccensione è pari a 225°C. In questa situazione, il periodo medio di attivazione ( $t_a$ ) coincide con il tempo in cui le particelle sono presenti nel processo a causa di un'operazione intrinseca del processo stesso (per esempio, all'interno del processo di produzione si verifica un fenomeno di abrasione o di attrito), mentre il periodo medio tra due attivazioni ( $t_i$ ) è pari al tempo in cui le particelle calde non sono presenti nel processo. Quindi, se un nastro trasportatore fosse operativo 20 minuti al giorno, in caso di mal funzionamento, al massimo genererebbe delle scintille meccaniche per 20 minuti, allora  $t_a$  risulterebbe pari a 20 minuti, ossia a 0,3 ore, e  $t_i$  uguale a 23,7 ore. Se il nastro trasportatore fosse attivo più volte in un ciclo di produzione (**Figura 6.3**), il parametro  $t_i$  coincide con il periodo minore tra due attivazioni di utilizzo (1 ora, la terza ora dall'inizio del ciclo di produzione ipotizzato), mentre  $t_a$  con l'arco maggiore di tempo in cui esso rimane in funzione (3 ore, dalla quarta alla sesta ora di produzione dall'inizio del ciclo).



**Figura 6.3:** Rappresentazione dell'attività di un nastro trasportatore in un ciclo ipotizzato e ripetuto due volte.

In questa maniera, è stato possibile rendere i parametri  $t_a$  e  $t_i$  indipendenti dalla durata di un ciclo produttivo, dato che sono stati riferiti al ciclo dell'operazione che prevede lo sviluppo delle scintille meccaniche come fonti d'innesco efficaci.

#### 6.1.4. Archi elettrici

Gli archi elettrici sono generati dalla presenza di materiali o impianti elettrici o da un mal funzionamento del motore elettrico di pompe e/o compressori (**Tabella 6.4.**) e sono da considerare sempre come fonti d'innesco efficaci (**Tabella 6.3.**). Se un processo industriale prevedesse l'apertura e la chiusura di circuiti elettrici, il periodo medio di attivazione ( $t_a$ ) sarebbe influenzato dalla velocità di apertura o di chiusura del circuito e, ipotizzando che esso sia istantaneo, si può supporre che  $t_a$  tenda a 0; invece, il periodo medio tra due attivazioni ( $t_i$ ) è in funzione della frequenza con la quale si apre e si chiude il circuito. Quindi, in questo caso  $t_a$  risulta trascurabile rispetto a  $t_i$ , dall'equazione (6.3) e dall'equazione (6.4) si può notare che, se  $t_i$  assumesse un valore molto maggiore di 1, allora entrambi i parametri  $a$  e  $\lambda$  risulterebbero pari a 0, quindi l'equazione (6.2), le cui restanti variabili sono descritte a pagina 58, risulterebbe pari a:

$$\ln Q_{(t)} = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J A_{ih} * \mu_j * [(1 - 0 * p_j) * e^{-0 * p_j * d_i} - 1] = 0 \quad (6.6)$$

Di conseguenza, la probabilità di non innesco è calcolabile come:

$$Q_{(t)} = e^0 = 1 \quad (6.7)$$

E, come complemento ad 1, si valuta la probabilità di innesco:

$$\text{probabilità d'innesco} = 1 - Q_{(t)} = 1 - 1 = 0 \quad (6.8)$$

Questo risultato è coerente con le osservazioni precedentemente fatte: se il periodo medio tra due attivazioni di una stessa fonte è molto alto, quindi  $t_i$  molto maggiore di 1, allora il circuito viene aperto o chiuso raramente e quindi è improbabile che la fonte d'innesco sia presente nel processo. Se le scintille elettriche fossero causate da un mal funzionamento di

una pompa,  $t_a$  non potrebbe essere considerato uguale a 0, ma sarà pari al tempo necessario per identificare il problema (rottura della pompa in questo caso) e il periodo necessario per fermarla. Invece, il valore di  $t_i$  identifica il tempo nel quale una pompa funziona correttamente, quindi, se una pompa si rompesse una volta ogni 30 ore, allora  $t_i$  sarebbe uguale a 30 ore. In questo caso, la frequenza di rottura della pompa, il tempo necessario per identificare il problema e la sua risoluzione sono dei valori variabili nel tempo, quindi ogni pompa avrà il periodo medio di rottura ( $t_i$ ) e il periodo medio di mal funzionamento ( $t_a$ ), ossia il tempo medio per identificare il problema e risolverlo. Dato che i parametri  $t_a$  e  $t_i$  si riferiscono al funzionamento effettivo di una particolare apparecchiatura di processo (nel caso appena analizzato di una pompa), si è riuscito a svincolare tali parametri dal tempo di produzione di un ciclo.

#### 6.1.5. Correnti vaganti e protezione catodica

Le correnti vaganti e la protezione catodica sono sempre delle fonti d'innesco efficaci quando sono presenti in una realtà industriale (**Tabella 6.3.**). Le correnti vaganti possono manifestarsi all'interno di una linea di produzione a causa di un cortocircuito, di una dispersione a terra mal funzionante, di un'induzione magnetica (indotta da impianti elettrici o da elevate radiofrequenze), di un fulmine [15]. Nel caso in cui esse fossero generate da un corto circuito o da un mal funzionamento della dispersione a terra, allora il periodo medio di attivazione ( $t_a$ ) coinciderebbe con il tempo necessario per ovviare al mal funzionamento che le ha generate, mentre il periodo medio tra due attivazioni ( $t_i$ ) equivale al tempo di corretto funzionamento. Dato che i due parametri sono riferiti al corretto funzionamento del circuito o della messa a terra, essi non dipendono dalla durata di un ciclo di produzione. Per esempio, se per aggiustare una dispersione a terra è necessaria 1 ora ed essa non funziona correttamente ogni 300 ore, allora  $t_a$  è uguale a 1 ora, mentre  $t_i$  è pari a 300 ore. Quindi, ad ogni circuito elettrico e ad ogni dispersione a terra sono associati dei determinati valori di  $t_a$  e  $t_i$  in base al loro funzionamento e alle loro caratteristiche di costruzione. Invece, se le correnti vaganti fossero generate da un'induzione magnetica, quindi dalla presenza di impianti elettrici o elevata radiofrequenza, oppure da fulmini, i parametri  $t_a$  e  $t_i$  sarebbero da valutare in maniera differente, dato che si sviluppano come effetto domino di altri eventi. In questi casi, i due parametri vengono riferiti alla durata dell'effetto domino, risultando nuovamente indipendenti dalla durata del ciclo. Per l'induzione magnetica, il parametro  $t_a$  coincide con il tempo in cui essa risulta efficace, mentre  $t_i$  equivale al tempo in cui l'induzione magnetica non è sufficiente per generare delle correnti vaganti. Se la corrente vagante fosse generata da un fulmine, allora i parametri  $t_a$  e  $t_i$  dovrebbero essere riferiti all'arco temporale in cui la corrente vagante esiste:  $t_i$  risulta trascurabile rispetto a  $t_a$  e dall'equazione (6.3)  $\lambda$  risulta inversamente proporzionale a  $t_a$  mentre  $a$  dall'equazione (6.4) è pari a 1.

#### 6.1.6. Elettricità statica

Un accumulo e la conseguente scarica di elettricità statica si verifica quando un fluido scorre all'interno di una tubazione isolata o non conduttrice [15]. In queste condizioni, il moto relativo del fluido rispetto alla tubazione genera una separazione di cariche che, in assenza di un'adeguata messa a terra, si accumulano generando l'elettricità statica e, quando essa viene scaricata, risulta sempre una fonte d'innesco efficace (**Tabella 6.3.**). Di conseguenza, il periodo medio di attivazione ( $t_a$ ) e il periodo medio tra due attivazioni ( $t_i$ ) dipendono dal corretto funzionamento della messa a terra che evita l'accumulo della carica elettrostatica e risultano indipendenti dalla durata di un ciclo produttivo: l'arco di tempo in cui la messa a terra funziona correttamente viene identificato con il parametro  $t_i$ , mentre il

tempo necessario per identificare un suo mal funzionamento e per la sostituzione, o per le operazioni necessarie per ripristinarne il corretto funzionamento, è rappresentato da  $t_a$ . Se una messa a terra lavorasse correttamente per 4000 ore e necessitassimo di 30 minuti per identificare un mal funzionamento e 1 ora per ripristinarla, allora  $t_i$  sarebbe 4000 ore mentre  $t_a$  1,5 ore. Quando la messa a terra non funziona correttamente è una fonte d'innesco efficace e risulta tale fino a quando non sarà risolto il problema, quindi ogni messa a terra sarà caratterizzata da un valore specifico sia di  $t_a$  sia di  $t_i$  in base al loro funzionamento. In un ambiente a rischio incendio e/o esplosione, questi parametri devono essere revisionati ogni 2 anni poiché la legge impone una verifica biennale [20] della continuità elettrica.

6.1.7. Radio frequenze da  $10^4$  Hz a  $10^{11}$  Hz e onde elettromagnetiche da  $3 \cdot 10^{11}$  Hz a  $3 \cdot 10^{15}$  Hz

Le situazioni in cui le radio frequenze da  $10^4$  Hz a  $10^{11}$  Hz e le onde elettromagnetiche da  $3 \cdot 10^{11}$  Hz a  $3 \cdot 10^{15}$  Hz sono da considerarsi efficaci sono riportate nella tabella 3.2 del documento emanato dalla commissione europea [19]. Ad esempio, se in un processo industriale sono presenti dei forni fusori ad arco, allora, se sono mal funzionanti, il periodo di funzionamento di tali apparecchiature coincide con il periodo medio di attivazione ( $t_a$ ), mentre il periodo in cui risultano spenti, quindi non in funzione, è pari al periodo medio tra due attivazioni ( $t_i$ ): anche in questo caso i parametri  $t_a$  e  $t_i$  sono indipendenti dalla durata di un ciclo produttivo.

6.1.8. Radiazioni ionizzanti

Le radiazioni ionizzanti risultano efficaci quando l'energia assorbita da una nube di sostanza pericolosa è maggiore del calore di combustione della sostanza stessa (**Tabella 6.3**). Il periodo medio di attivazione ( $t_a$ ) è pari all'arco di tempo in cui le radiazioni ionizzanti sono in grado di trasmettere un'energia maggiore rispetto al calore di combustione della sostanza dispersa, mentre il periodo medio tra due attivazioni ( $t_i$ ) è uguale all'arco di tempo in cui le radiazioni ionizzanti trasmettono un'energia inferiore al calore di combustione della sostanza. Dato che l'energia di una radiazione diminuisce nel tempo, il parametro  $t_a$  dipende dalla potenza iniziale delle radiazioni ionizzanti e dal calore di combustione della sostanza dispersa: una radiazione ionizzante, se considerata efficace, una volta che dissipa la sua energia, non sarà più in grado di trasmettere un'energia sufficiente da causare la combustione della sostanza dispersa. Lo sviluppo di tali radiazioni ionizzanti è caratterizzato da un unico valore di  $t_a$ . Se, per esempio, delle radiazioni ionizzanti fossero delle fonti d'innesco efficaci per 40 minuti e, all'interno del processo, venissero generate ogni 30 ore, allora  $t_a$  risulterebbe pari a 0,6 ore (40 minuti), e  $t_i$  uguale a 30 ore.

6.1.9. Ultrasuoni

Gli ultrasuoni sono considerati efficaci in base all'energia che una nube di sostanza pericolosa assorbe da essi: se tale energia è maggiore del calore di combustione della sostanza stessa, allora tali fonti d'innesco sono da considerarsi efficaci (**Tabella 6.3**). Il periodo medio di attivazione ( $t_a$ ) equivale all'arco di tempo in cui gli ultrasuoni sono delle fonti d'innesco efficaci, mentre il periodo medio tra due attivazioni ( $t_i$ ) coincide con l'arco di tempo in cui essi non sono efficaci. Poiché, una volta generati, gli ultrasuoni possono solamente disperdere l'energia, il valore di  $t_a$  è univoco per gli ultrasuoni generati nello stesso arco di tempo ed è tanto maggiore quanto più è elevata la potenza degli ultrasuoni generati: un'elevata potenza degli ultrasuoni implica un'elevata energia trasmessa, quindi una maggiore energia assorbita da una nube di sostanza pericolosa dispersa. Se gli

ultrasuoni vengono generati una volta ogni 45 ore e sono da considerare efficaci per 3 ore, allora  $t_a$  è uguale a 3 ore e  $t_i$  a 45 ore.

#### 6.1.10. Compressione adiabatica e onde d'urto

La compressione adiabatica e le onde d'urto sono delle fonti d'innesco efficaci in base alla temperatura raggiunta a causa della compressione: se fosse maggiore della temperatura di autoaccensione della sostanza dispersa, allora la fonte d'innesco è da considerare efficace (**Tabella 6.3.**). Quindi, se si identificano delle compressioni adiabatiche o delle onde d'urto come fonti d'innesco efficaci, allora il periodo medio di attivazione ( $t_a$ ) coincide con l'arco di tempo consecutivo nel quale tale fonte è efficace, mentre il periodo medio tra due attivazioni ( $t_i$ ) equivale all'intervallo di tempo in cui la fonte d'innesco non risulta efficace tra due periodi di attivazione. Per esempio, se una compressione adiabatica produce una temperatura maggiore della temperatura di autoaccensione di una sostanza dispersa per 1 ora e tale condizione si verifica ogni 4 ore, allora  $t_a$  e  $t_i$  sono rispettivamente uguali a 1 ora e 4 ore. Quando esse vengono generate, durante la propagazione la loro temperatura diminuisce, di conseguenza, se sono efficaci, sono tali da quando vengono generate fino a quando la loro temperatura non risulta inferiore alla temperatura di autoaccensione di una sostanza dispersa accidentalmente in atmosfera. Quindi, ogni compressione adiabatica e/o onda d'urto efficace può assumere un unico valore di  $t_a$ . Di conseguenza, i parametri  $t_a$  e  $t_i$  sono entrambi riferiti al ciclo della compressione adiabatica o delle onde d'urto e non all'intero ciclo produttivo.

#### 6.1.11. Reazioni esotermiche

Le reazioni esotermiche sono da considerare efficaci se la temperatura raggiunta a causa dell'elevata generazione di calore è maggiore della temperatura di autoaccensione della sostanza pericolosa dispersa in atmosfera (**Tabella 6.3.**) e tale arco di tempo coincide con il periodo medio di attivazione ( $t_a$ ). Se una reazione esotermica supera la temperatura di autoaccensione di una sostanza per 30 minuti ogni 2 ore, allora  $t_a$  è pari a 0,5 ore e  $t_i$  a 2 ore.

## 7. Applicazione dello studio delle fonti d'innescio

Si è deciso di applicare lo studio delle fonti d'innescio al reparto B poiché è quello maggiormente dettagliato nel rapporto di sicurezza dell'azienda. Il reparto è a sua volta suddiviso in compartimenti, ognuno dei quali contiene una o due linee produttive. Inizialmente, invece di suddividere le fonti d'innescio tra puntuali e distribuite, come proposto dal metodo di Taylor, sono state suddivise in specifiche e generali: le fonti d'innescio specifiche variano da un'apparecchiatura ad un'altra, come ad esempio le superfici calde, che dipendono dalla temperatura di esercizio dell'apparecchiatura analizzata; mentre quelle generali sono relative all'intero compartimento, come per esempio la frequenza di fulminazione (**Tabella 7.1**).

**Tabella 7.1.** Classificazione delle fonti d'innescio del D. Lgs. 08/03/2006.

Fonti d'innescio del D. Lgs. 2006	Categoria	Motivazione
Superfici calde	Specifica	Dipende dalla temperatura operativa dell'apparecchiatura
Fiamme, gas, particelle calde	Specifica	Si sviluppano in casi particolare nel compartimento (per esempio fornaci, saldatura)
Scintille di origine meccanica	Specifica	Si sviluppano in presenza di particolari apparecchiature nel compartimento (per esempio ventilatori)
Materiali ed impianti elettrici	Generale e specifica	Generale: impianto di illuminazione Specifica: per esempio mal funzionamento di pompe o di cuscinetti sulle rotaie
Correnti vaganti e protezione catodica	Specifica	Si possono sviluppare in tubazioni e apparecchiature
Elettricità statica	Specifica	Si possono sviluppare in tubazioni e apparecchiature
Fulmini	Generale	La frequenza di fulminazione risulta immutata in tutto il sito
Radio frequenze da $10^4$ Hz a $10^{11}$ Hz	Specifica	Si sviluppano in presenza di particolari apparecchiature nel compartimento
Radiazioni ionizzanti	Specifica	Si sviluppano in presenza di particolari apparecchiature nel compartimento
Ultrasuoni	Specifica	Si sviluppano in presenza di particolari apparecchiature nel compartimento
Compressione adiabatica e onde d'urto	Specifica	Dipende dalla pressione operativa dell'apparecchiatura
Reazioni esotermiche	Specifica	Si sviluppano in presenza di particolari reazioni chimiche e sostanze nel compartimento

In seguito, per poter collocare in modo univoco ed immediato le fonti d'innescio su una mappa, si è associata una sigla ad ogni singola fonte ed una lettera per ogni compartimento analizzato. Inoltre, per applicare il metodo di Taylor presentato nel capitolo precedente, le fonti d'innescio sono classificate anche come distribuite o puntuali: distribuite se interessano un'intera area di un'apparecchiatura, come ad esempio le superfici calde o gli impianti

elettrici, puntuali se sono riconducibili a dei punti, come le particelle calde o i motori delle pompe (Tabella 7.2.; Tabella 7.3.).

**Tabella 7.2.** Identificazione tramite una sigla e classificazione delle fonti d'innesco del D. Lgs. 2006.

Fonti d'innesco D. Lgs. 2006	Sigla	Tipologia
Superfici calde	SC	Distribuita
Fiamme libere	FL	Puntuale
Gas caldi	GC	Distribuita
Particelle calde	PC	Puntuale
Scintille meccaniche	SM	Puntuale
Materiali ed impianti elettrici	MIE	Distribuita e puntuale
Correnti vaganti e protezione catodica	CVPC	Distribuita
Elettricità statica	ES	Distribuita
Fulmini	F	Distribuita
Radio frequenze da $10^4$ Hz a $10^{11}$ Hz	RF	Puntuale
Onde elettromagnetiche da $3 \cdot 10^{11}$ Hz a $3 \cdot 10^{15}$ Hz	OE	Puntuale
Radiazioni ionizzanti	RI	Puntuale
Ultrasuoni	U	Puntuale
Compressione adiabatica e onde d'urto	CAOU	Distribuita
Reazioni esotermiche	RE	Puntuale

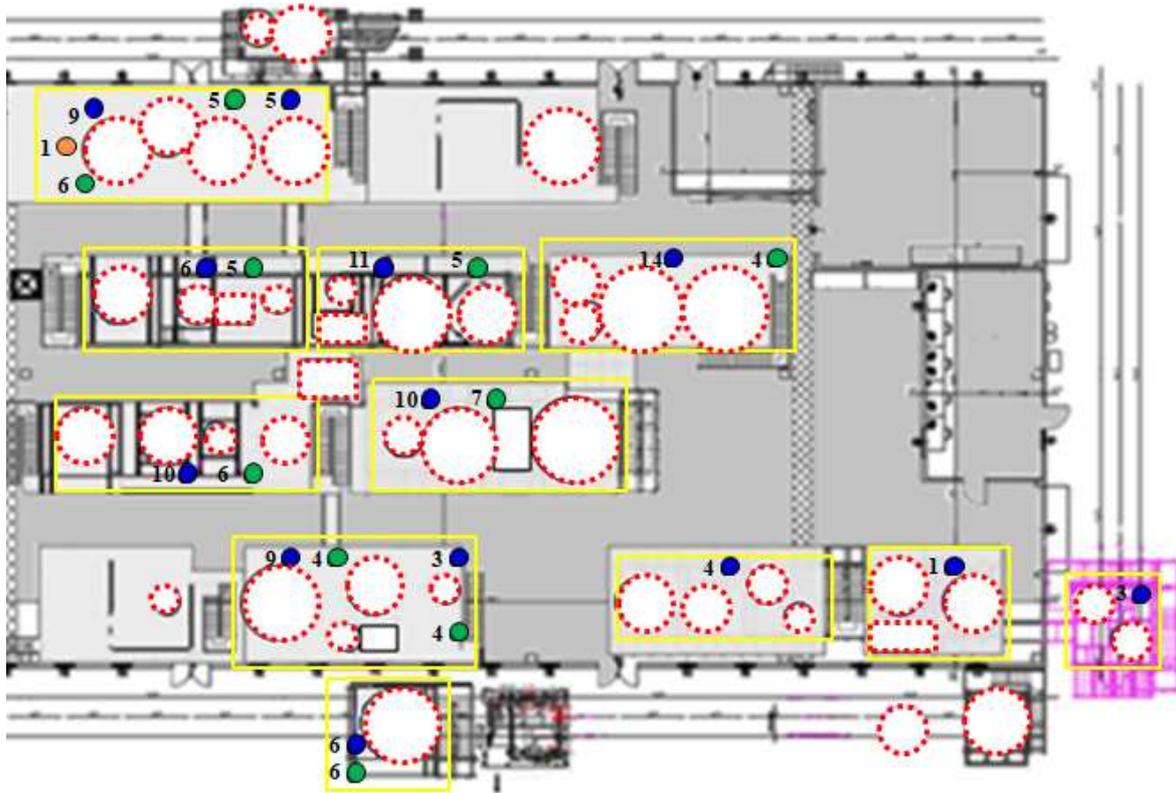
**Tabella 7.3.** Identificazione dei compartimenti.

Compartimento	Lettera corrispondente
Linea di produzione 1	A
Linea di produzione 2	B
Linea di produzione 3	C
Linea di produzione 4	D
Linea di produzione 5	E
Linea di produzione 6	F
Linea di produzione 7	G
Linea di produzione 8	H
Linea di produzione 9	I
Linea di produzione 10	L
Linea di produzione 11	M
Linea di produzione 12	N
Linea di produzione 13	O
Linea di produzione 14	P
Linea di produzione 15	Q

In nessun settore del reparto considerato sono presenti dei macchinari e/o delle apparecchiature che possono generare radio frequenze, radiazioni ionizzanti ed ultrasuoni, di conseguenza tali fonti d'innesco non sono state considerate all'interno della mappa del reparto. Inoltre, le reazioni sviluppate dall'azienda sono o debolmente esotermiche o endotermiche, quindi anche la fonte d'innesco "*reazioni esotermiche*" è da considerare trascurabile. Quasi tutte le apparecchiature lavorano a  $T > T_{ambiente}$  quindi le superfici calde sono da collocare in prossimità di ogni apparecchiatura. La maggior parte delle apparecchiature sono collegate tra loro tramite tubi e caricate con nastri trasportatori, di conseguenza vi è la possibilità che si sviluppino scintille meccaniche e elettricità statica a seguito di guasti o inefficienza dei collegamenti equipotenziali. Nel reparto sono presenti anche numerosi motori elettrici dedicati o all'accensione delle pompe o all'agitazione delle apparecchiature in modo da permettere il trasferimento delle sostanze da un'apparecchiatura ad un'altra o all'interno

dell'apparecchiatura stessa. Un mal funzionamento di questi componenti genera delle scintille elettriche. Le correnti vaganti e la protezione catodica si possono trascurare nell'azienda analizzata in quanto non possono essere generate all'interno dello stabilimento.

Le potenziali fonti d'innesco che sono state mappate nel reparto sono le superfici calde (tratteggiate in rosso), i gas caldi (puntini verdi), i materiali ed impianti elettrici (puntini blu), le scintille meccaniche (puntini arancioni) e l'elettricità statica (rettangoli gialli) (**Figura 7.1**).



**Figura 7.1:** Collocazione delle fonti d'innesco sulla mappa delle apparecchiature contenenti sostanze infiammabili del reparto B.

Per identificare in maniera più precisa la collocazione delle potenziali fonti d'innesco nelle linee di produzione, esse vengono individuate sui P&I di ciascun processo: a titolo di esempio si riporta la collocazione delle fonti d'innesco nelle prime due linee produttive (**Figura 7.2.a** e **Figura 7.2.b**):

- le superfici calde coincidono con le superfici esterne delle apparecchiature;
- i gas caldi sono collocati in prossimità delle valvole di sfogo;
- i materiali ed impianti elettrici si posizionano su pompe e su agitatori;
- le scintille meccaniche sono in corrispondenza dei nastri trasportatori;
- l'elettricità statica coincide con i tubi nei quali scorrono delle sostanze.

La collocazione delle fonti d'innesco delle restanti linee è riportata nell'allegato A.

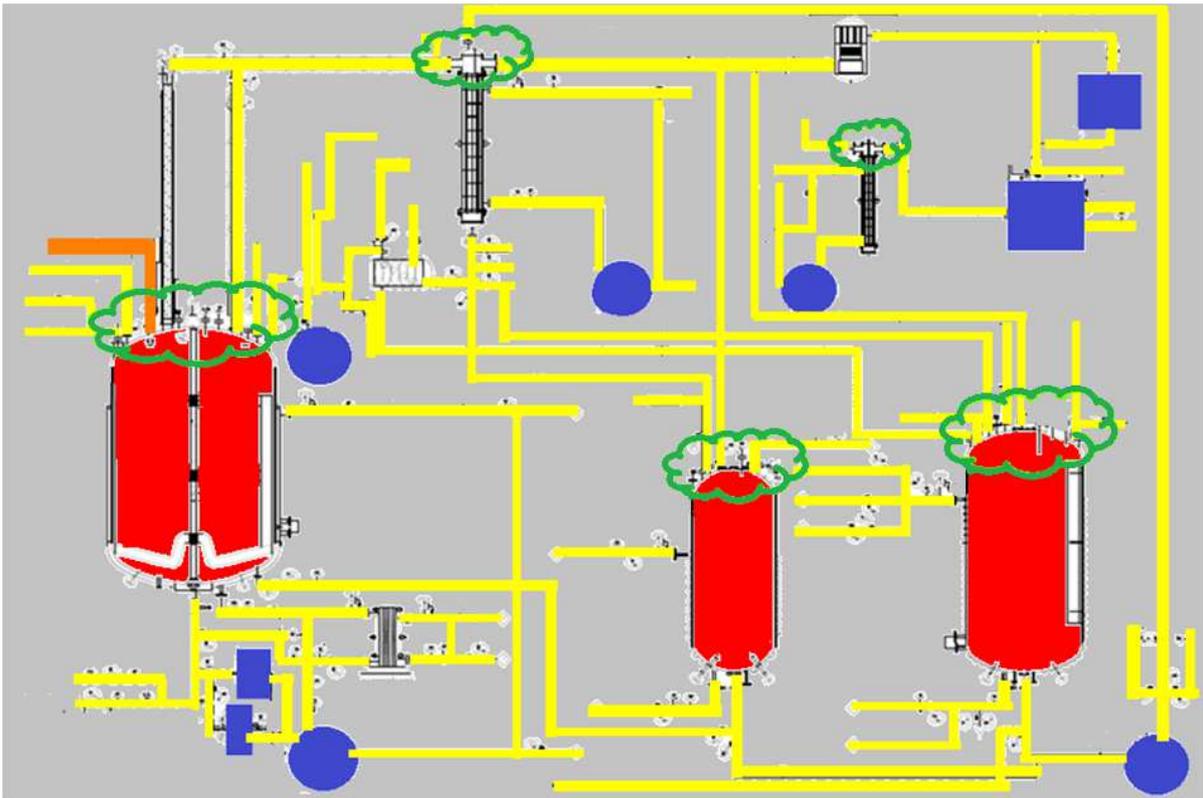


Figura 7.2.a: Collocazione delle fonti d'innesco nella linea di produzione 1 del reparto B.

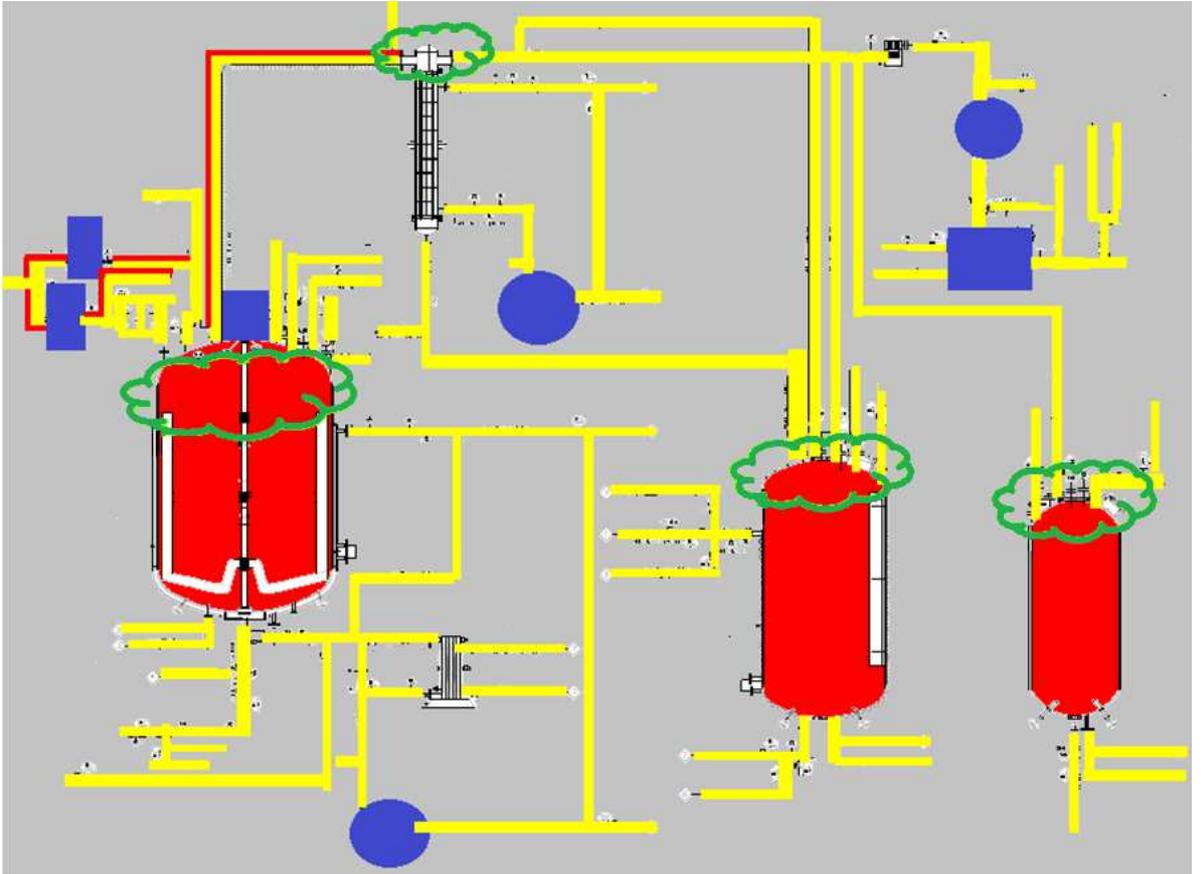


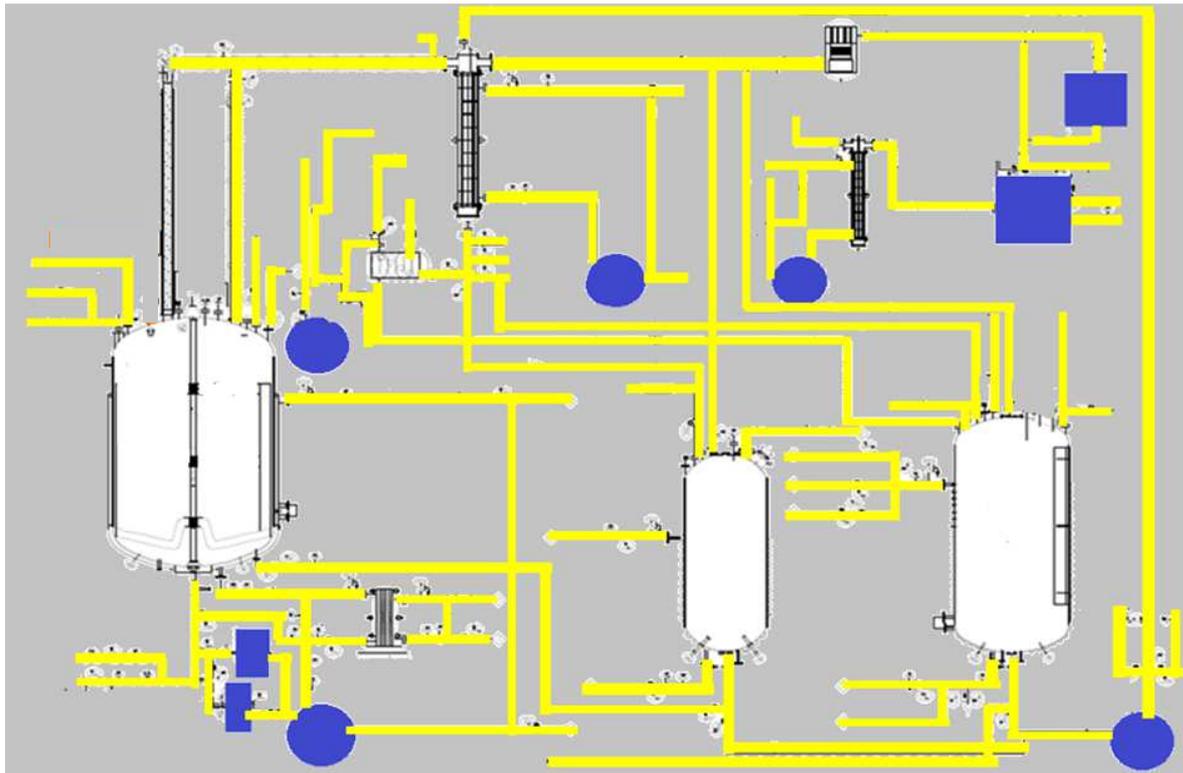
Figura 7.2.b: Collocazione delle fonti d'innesco nella linea di produzione 2 del reparto B.

Identificate e numerate le potenziali fonti d'innesco, si deve valutare se siano efficaci o non efficaci, basandosi sulla **Tabella 6.3**, in modo da poter quantificare i parametri che costituiscono l'equazione (6.2) solamente per le fonti d'innesco efficaci e valutarne la probabilità di non innesco. Nella realtà industriale analizzata, tutte le fonti d'innesco identificate come "*superfici calde*", "*gas caldi*" e "*scintille meccaniche*" non sono fonti d'innesco efficaci poiché la temperatura raggiunta da tali elementi è inferiore alla temperatura di autoaccensione della sostanza esaminata e rilasciata accidentalmente nel reparto. Invece, un mal funzionamento di apparecchiature elettriche e/o un'interruzione di una o più messe a terra generano le fonti d'innesco "*materiali ed impianti elettrici*" ed "*elettricità statica*" che sono da considerarsi come fonti d'innesco efficaci (**Figura 7.3**).

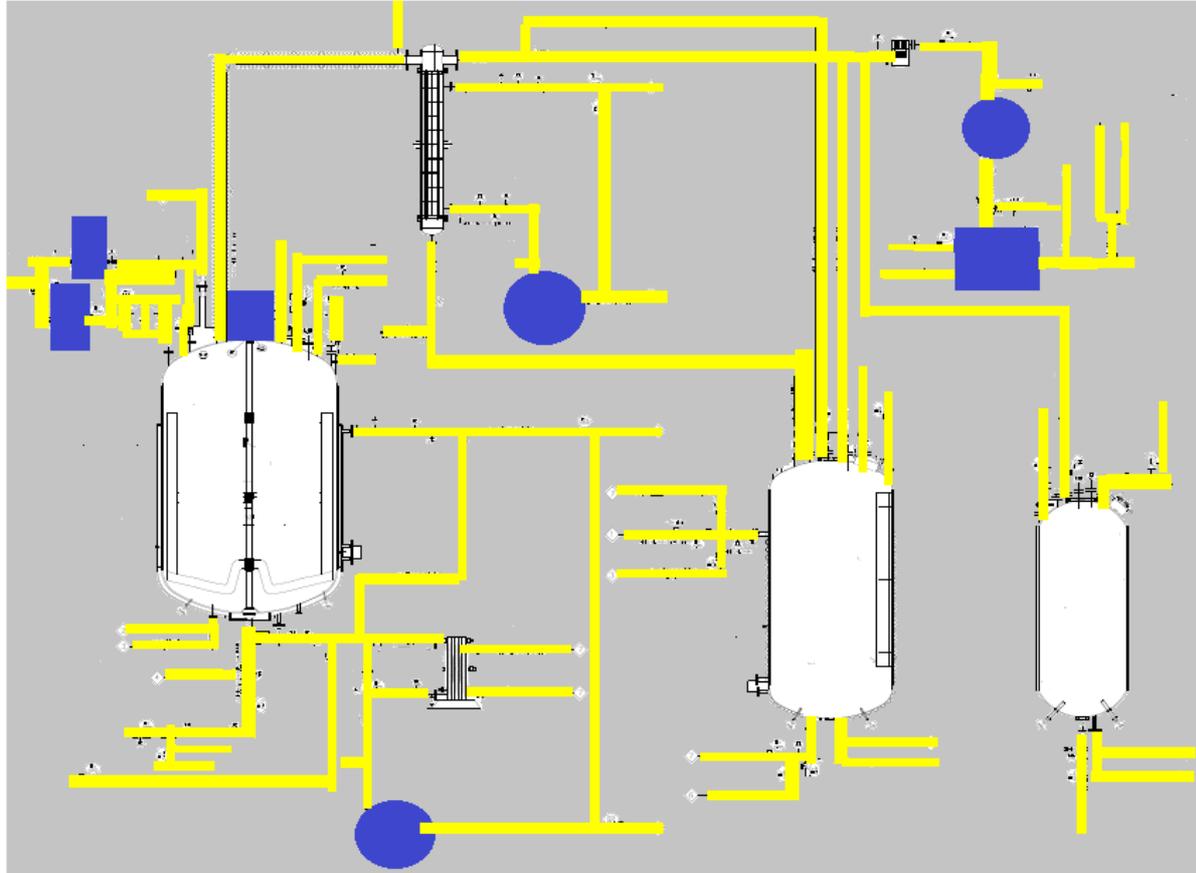


**Figura 7.3:** Collocazione delle fonti d'innesco efficaci sulla mappa delle apparecchiature contenenti sostanze infiammabili del reparto B.

Analogamente a quanto eseguito in precedenza, per identificare in maniera più precisa la collocazione delle fonti d'innesco efficaci nelle linee di produzione, esse vengono individuate sui P&I di ciascun processo: a titolo di esempio si riporta la collocazione delle fonti d'innesco efficaci delle prime due linee produttive (**Figura 7.4.a** e **Figura 7.4.b**). La collocazione delle fonti d'innesco delle restanti linee è visibile nell'allegato B.



**Figura 7.4.a:** Collocazione delle fonti d'innesco efficaci nella linea di produzione 1 del reparto B.



**Figura 7.4.b:** Collocazione delle fonti d'innesco efficaci nella linea di produzione 2 del reparto B.

## 8. Osservazioni e conclusioni

Nel lavoro proposto è stato sviluppato un nuovo metodo per la valutazione del rischio incendio e/o esplosione nell'industria di processo: oltre ad identificare le apparecchiature maggiormente pericolose (che causano danni maggiori in presenza di un incendio/esplosione), si sono individuate le possibili fonti d'innesco efficaci che possono provocare l'origine di un incendio o di un'esplosione. In questa maniera, si sono collocate su una mappa le apparecchiature maggiormente pericolose e le fonti d'innesco efficaci. Le aree ad alto rischio coincidono con le zone in cui vi sono sia un'apparecchiatura pericolosa sia una fonte d'innesco efficace.

Per determinare le apparecchiature maggiormente pericolose è stato utilizzato il metodo SW&HI [1]: l'indice SW&HI identifica le apparecchiature che, in caso di incendio/esplosione, provocano danni moderati al 50% delle strutture/persone in un raggio pari al valore stesso dell'indice. Per applicare questo metodo ad una realtà industriale, si deve stabilire quali apparecchiature contengono sostanze pericolose e, in base alla fase in cui si può verificare il rilascio, ogni apparecchiatura deve essere classificata come indicato in **Tabella 2.1.**, ossia:

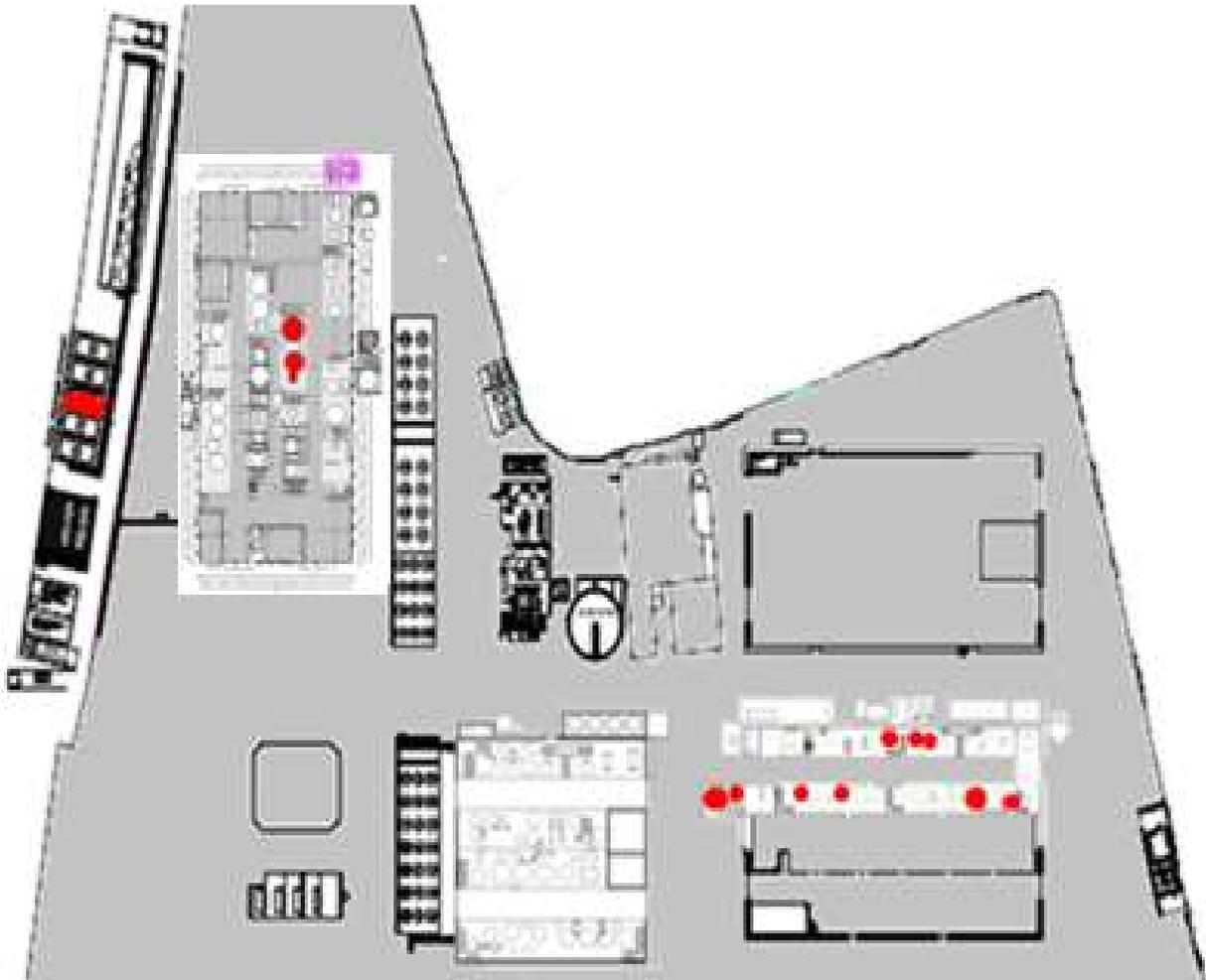
- unità di stoccaggio;
- unità di trasformazione fisica;
- unità di trasformazione chimica;
- unità di trasporto;
- altre unità.

Inoltre, per applicare correttamente il metodo, sono necessarie delle informazioni sia sulle condizioni operative del processo sia sulla sostanza analizzata (**Tabella 2.2.**).

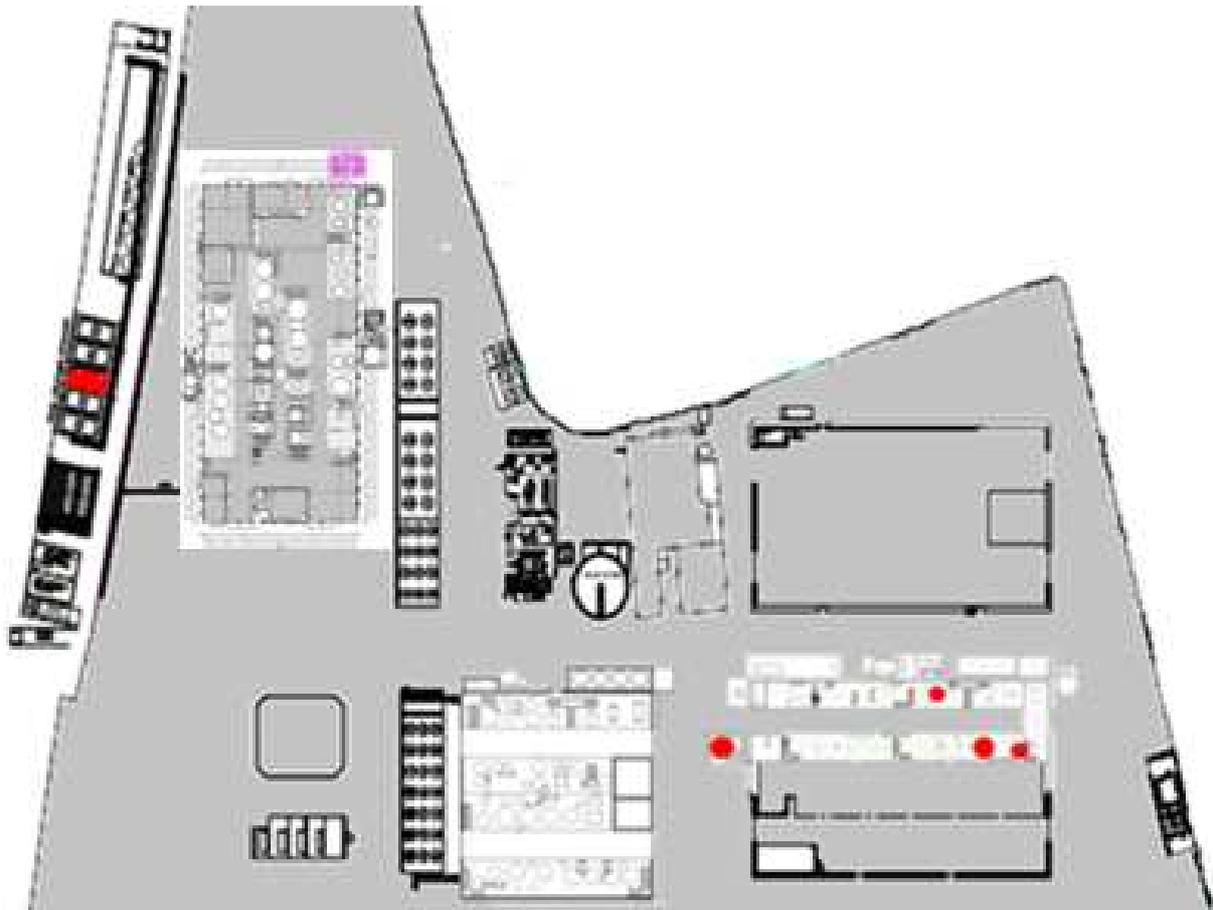
Si è deciso di utilizzare il metodo SW&HI in quanto è un valido metodo semi-quantitativo che riduce e semplifica la valutazione del rischio rispetto agli altri algoritmi presenti in letteratura. Il metodo SW&HI si basa sulla quantificazione di indici e di fattori [1]: quantificare i valori numerici dei parametri risulta un lavoro meno oneroso rispetto alla costruzione di alberi di guasto o di alberi degli eventi. I valori degli indici vengono forniti in base al loro significato, quello dei fattori sono funzioni delle caratteristiche del processo e della sostanza pericolosa analizzata [1]. Il fattore energetico  $F1$  dipende dal calore di combustione della sostanza considerata, equazione (2.9): analizzando sostanze differenti all'interno di apparecchiature che operano sempre nelle medesime condizioni, l'indice SW&HI subisce una notevole variazione (paragrafo 3.1) e, in base alla sostanza considerata, l'apparecchiatura assume un indice SW&HI maggiore di 5 o minore di 5. Si è deciso di considerare 5 come valore soglia di accettabilità del rischio in quanto, imponendo tale valore, si sono identificate come "*apparecchiature a rischio*" le stesse apparecchiature che vengono definite tali dal Rapporto di Sicurezza vigente nell'azienda analizzata. Per un'altra realtà industriale, il valore soglia di accettabilità del rischio potrebbe assumere un valore differente. Invece, i fattori energetici  $F2$  e  $F3$  sono funzione delle condizioni operative di processo, equazioni (2.10) e (2.11). Quindi, è stato possibile verificare come tali condizioni modificano l'indice SW&HI: dallo studio effettuato nel paragrafo 3.2, una variazione notevole di temperatura, pressione e volume risulta trascurabile sull'indice SW&HI. La variazione di questi parametri influenza notevolmente il valore del fattore al quale si riferiscono, ma a seguito delle operazioni che si devono eseguire per ottenere il valore finale dell'indice SW&HI, l'effetto di questa variazione ha un impatto notevolmente ridotto sull'indice. Al contrario, non si è approfondito l'effetto delle variabili sul fattore energetico  $F4$  poiché esso

appare nell'equazione dell'*Hazard Potential* solo se l'apparecchiatura considerata rientra nelle unità di reazione chimica (**Tabella 2.3**)

I valori dell'indice SW&HI ottenuti per le varie apparecchiature sono riportate nel capitolo 5. Per le apparecchiature che hanno un indice SW&HI maggiore di 5 (**Figura 8.1**), si è ipotizzato di aggiungere dei sistemi di protezione (**Figura 8.2**) e/o di ridurre il quantitativo di sostanza contenuto con lo scopo di verificare se a ciò corrispondesse una diminuzione non trascurabile dell'indice SW&HI, e di conseguenza una limitazione di un potenziale effetto domino, valutabile in termini di area sottesa dall'indice di un'apparecchiatura e di coinvolgimento delle apparecchiature limitrofe (**Tabella 5.2, Tabella 5.3 e Tabella 5.4**).



**Figura 8.1:** Visualizzazione delle apparecchiature aventi un indice SW&HI superiore a 5 nelle condizioni di normale funzionamento dell'impianto, su una mappa ingrandita dello stabilimento.



**Figura 8.2:** Visualizzazione delle apparecchiature aventi un indice SW&HI superiore a 5 a seguito dell'introduzione di possibili dispositivi di protezione, su una mappa ingrandita dello stabilimento.

Secondo il metodo, l'indice SW&HI pari a 5 coincide con un basso livello di rischio (**Figura 2.2**), quindi, riducendo l'indice di ogni apparecchiatura ad un valore inferiore a 5, l'area interessata da un eventuale incendio e/o esplosione è notevolmente ridotta. Si è deciso di apportare delle modifiche di costruzione e/o di riempimento delle apparecchiature che hanno un indice maggiore di 5 perché si è stimato che tale valore sia idoneo per garantire un livello di rischio accettabile nella realtà industriale analizzata. Infatti, imponendo come valore soglia 5, si sono identificate come "*apparecchiature a rischio*" le stesse apparecchiature che vengono definite tali nel Rapporto di Sicurezza ex. D. Lgs. 105/15. Per un'altra realtà industriale, il valore soglia di accettabilità del rischio potrebbe assumere un valore differente, considerando che l'indice  $> 5$  rappresenta un livello di rischio moderato (**Figura 2.2**). Le apparecchiature identificate come "*apparecchiature a rischio*" contengono tutte più di 5 tonnellate di n-eptano: il n-eptano ha un calore di combustione molto elevato (44700 kJ/mol) e, come esposto nel paragrafo 3.1, l'importanza di questa proprietà sull'indice SW&HI è molto elevata. Inoltre, indipendentemente dall'analizzare l'apparecchiatura come "*unità di stoccaggio*" o "*unità di trasformazione fisica*", ad un elevato quantitativo di sostanza pericolosa corrisponde un elevato indice SW&HI, dato che il fattore energetico  $FI$  è direttamente proporzionale anche a questa proprietà, equazione (2.9).

Per valutare quali fonti d'innescio sono in grado di provocare un incendio e/o un'esplosione, si sono analizzate le normative vigenti in Europa ed in Italia: nella norma europea UNI EN 1127-1 [14] sono elencate tutte le fonti d'innescio e nel D. Lgs. 08/03/2006 [3] sono descritte dettagliatamente. Dato che si sono considerate le caratteristiche

infiammabili delle sostanze, è stato possibile associare le strategie antincendio presenti nel D. Lgs. 08/03/2006 [3] con le criticità del metodo SW&HI [1] (**Tabella 4.2.**).

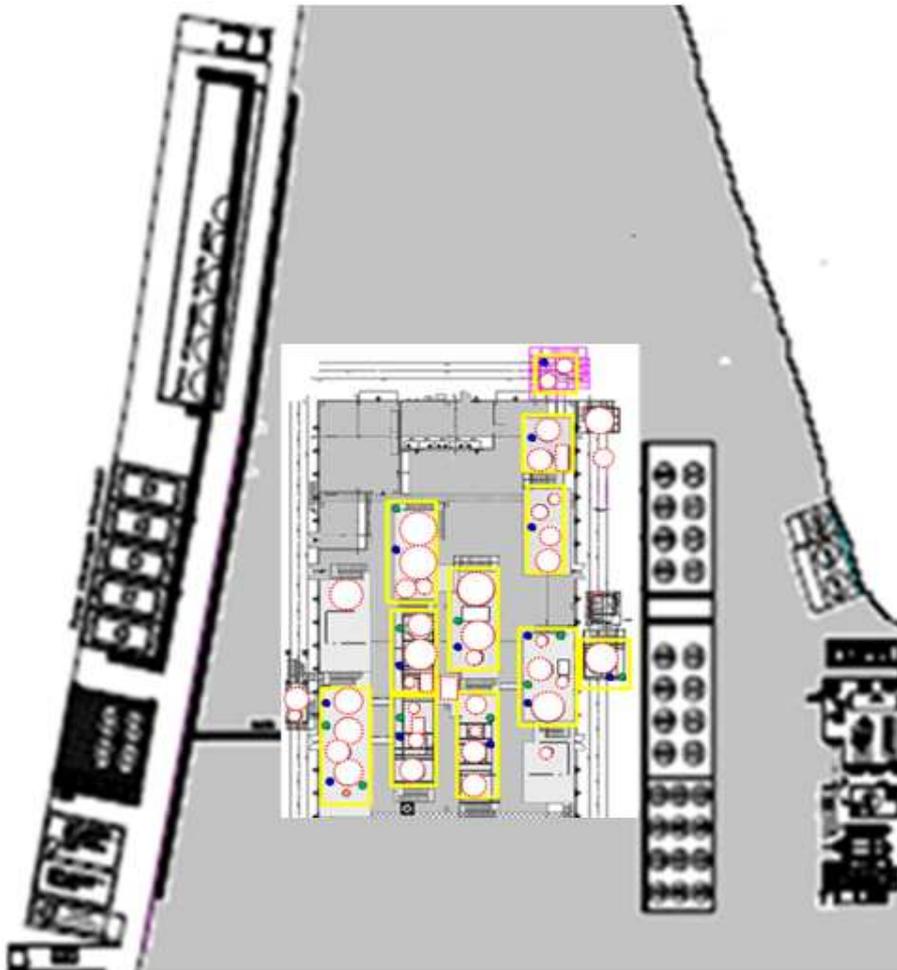
Per eseguire una mappatura delle fonti d'innesco presenti nella realtà industriale considerata, si sono esaminate le linee produttive dell'azienda. Per ogni linea di produzione si deve essere a conoscenza di:

- come variano le condizioni operative;
- quali reazioni vengono eseguite;
- la tipologia delle apparecchiature presenti nella linea di produzione stessa e nell'area considerata;
- come le sostanze vengono trasportate da un'apparecchiatura all'altra;
- quali protezioni vengono utilizzate.

A questo punto, si escludono le fonti d'innesco che non possono essere presenti e si collocano le restanti:

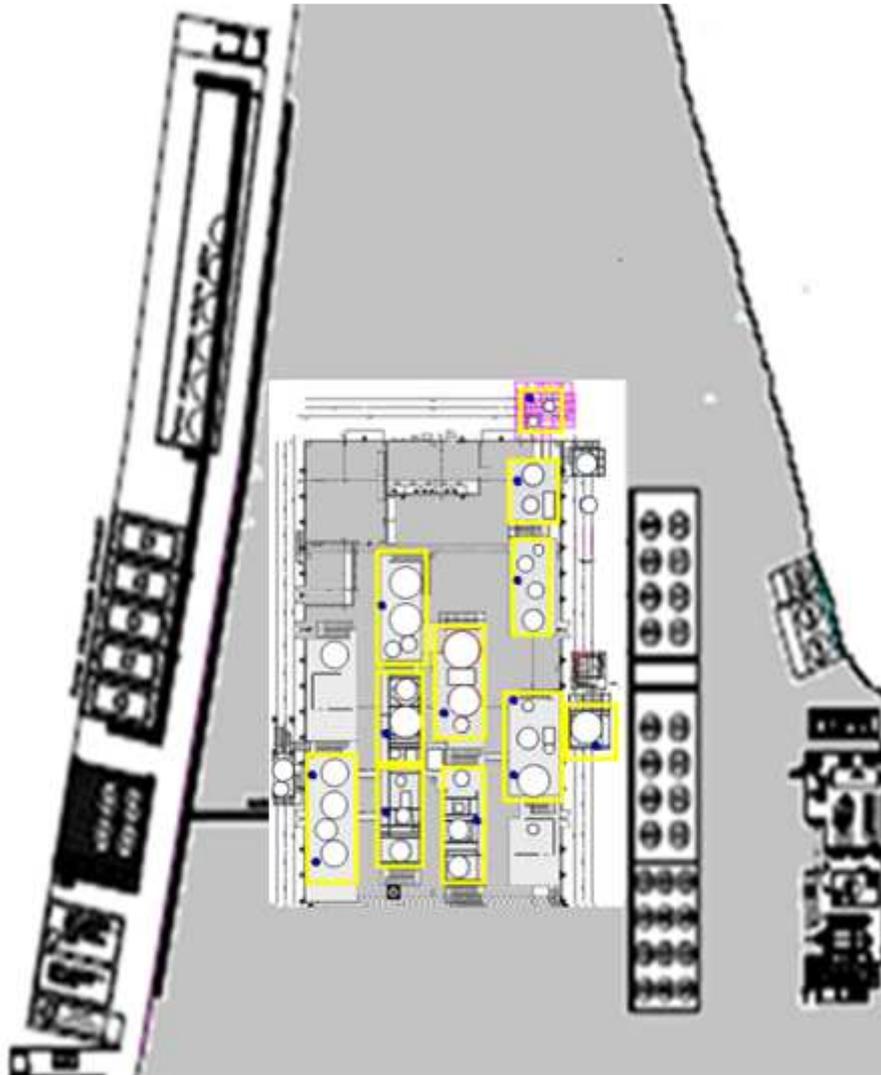
- quelle puntuali (superfici calde,...) si collocano in corrispondenza dell'apparecchiatura;
- quelle distribuite (impianto di illuminazione,...) si considerano uniformemente per tutto il reparto.

Le fonti d'innesco sono state collocate unicamente nel reparto B dell'azienda analizzata (**Figura 8.3.**).



**Figura 8.3:** Collocazione delle fonti d'innesco nel reparto B su un ingrandimento della mappa dell'industria analizzata.

Per calcolare la probabilità di non innesco tramite la formula modificata di Taylor, equazione (6.2), si deve valutare quali fonti d'innesco sono efficaci (**Figura 8.4**).



**Figura 8.4:** Collocazione delle fonti d'innesco efficaci nel reparto B su un ingrandimento della mappa dell'industrial analizzata.

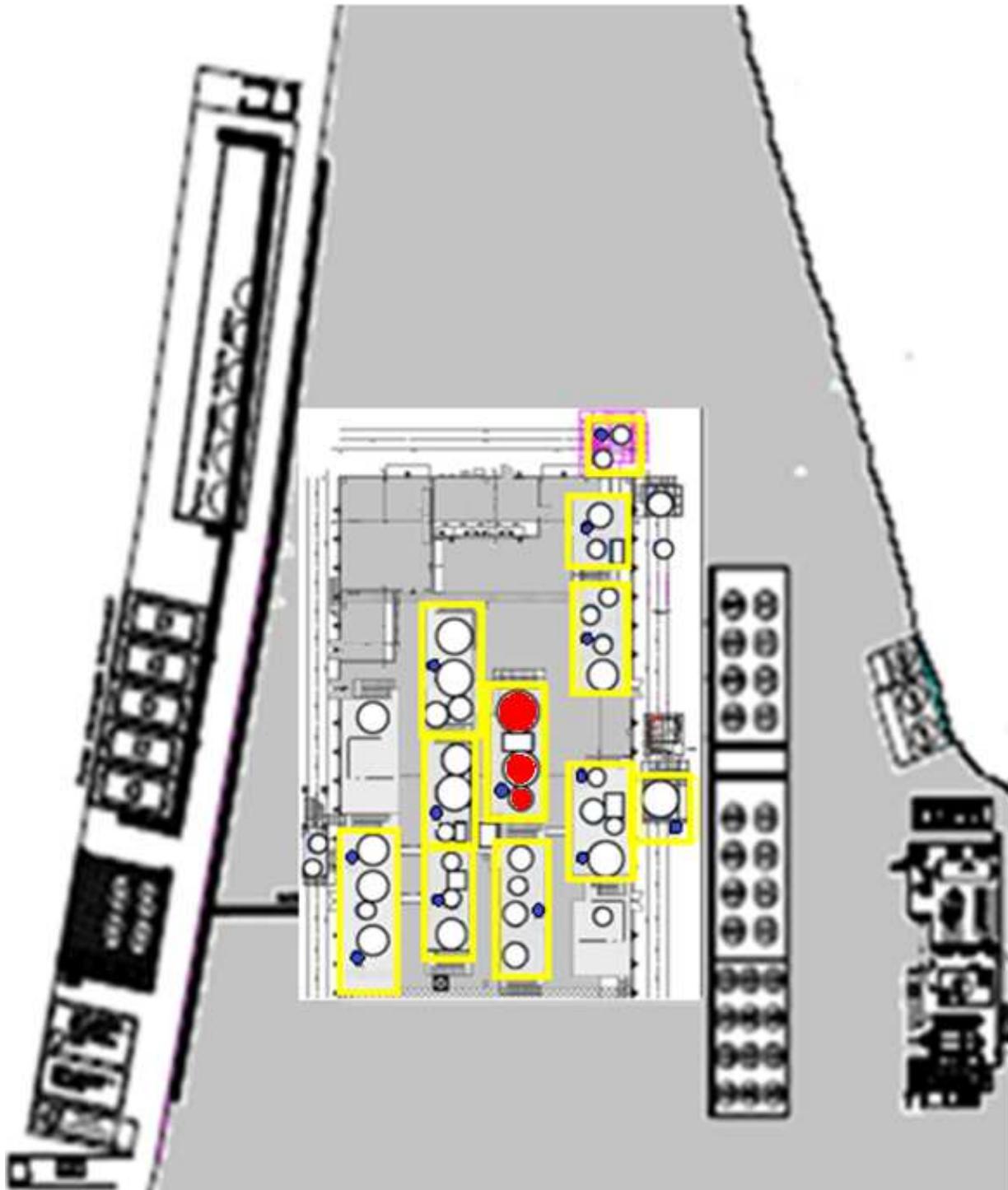
L'equazione (6.2) è stata applicata a tutte le linee di produzione del reparto B per le fonti d'innesco efficaci:

- materiali ed impianti elettrici;
- elettricità statica.

Per valutare i parametri presenti nell'equazione (6.2), si è applicato il metodo descritto nel paragrafo 6.1. Per esempio, per determinare i parametri  $t_i$  e  $t_a$  delle fonti d'innesco identificate con materiali ed impianti elettrici si è chiesto all'azienda analizzata, per ogni pompa e per ogni motore presente nel reparto B, il tempo di guasto atteso e il tempo necessario per la riparazione/sostituzione.

Identificate le apparecchiature aventi un indice SW&HI maggiore di 5 (**Figura 5.6**) e le fonti d'innesco efficaci (**Figura 7.3**) nel reparto B, le aree del reparto in cui vi è una maggiore probabilità che si sviluppi un incendio e/o un'esplosione sono le zone in cui sono presenti sia le apparecchiature aventi un indice SW&HI maggiore di 5 sia le fonti d'innesco efficaci (**Figura 8.5**): solamente la linea centrale del reparto B è a rischio incendio e/o esplosione.

Questa linea contiene le apparecchiature B-14, B-15 e B-16: lavorano tutte con più di 5,5 tonnellate di n-eptano a bassa pressione (15 kPa).



**Figura 8.5:** Sovrapposizione della mappa contenente le apparecchiature con indice SW&HI maggiore di 5 (evidenziate in rosso) con la mappa delle fonti d'innesco efficaci (evidenziate in giallo e in blu).

## 9. Bibliografia

- [1] Khan F.I. , Husain T. and Abbasi S.A., 2001, "SAFETY WEIGHTED HAZARD INDEX (SWeHI) A New, User-friendly Tool for Swift yet Comprehensive Hazard Identification and Safety Evaluaztion in Chemical", *Process Saf. Evinron. Prot.*, vol. **79** (2), pp. 65-80.
- [2] Presidente della Repubblica, *D.Lgs. 9 aprile 2008, n. 81. TESTO UNICO SULLA SALUTE E SICUREZZA SUL LAVORO*, 2008.
- [3] Decreto Legislativo, *8 marzo 2006, n.139 e s.m.i.*
- [4] Direttiva 2012/18/UE DEL PARLAMENTO EUROPEO E DEL CONSIGLIO, "*Controllo del pericolo di incendi rilevanti connessi con sostanze pericolose*", 2012.
- [5] Presidente della Repubblica, *D.lgs. 26 giugno 2015, n.105 Attuazione della direttiva 2012/18/UE relativa al controllo del pericolo di incidente rilevanti connessi con sostanze pericolose*. 2015.
- [6] Taylor J. R., "Probability of ignition", *The QRAR Project*, vol. **7**, 2012.
- [7] <http://cameochemicals.noaa.gov> (data di ultima consultazione 06/2020)
- [8] <http://www.merckmillipore.com> (data di ultima consultazione 06/2020)
- [9] Etowa C.B. , Amyotte P.R. , Pegg M.J. e Khan F.I. , 2002, "Quantification of inherent safety aspects of the Dow incedes", *Journal of Loss Prevention in the Process Industies*, pp. 477-487.
- [10] NFPA 704, National Fire Protection Association, "*Standard System for the Identification of the Hazards of Materialsfor Emergency Response*", 2017.
- [11] Ariano P.F. , Robotto A. , Ricchiuti A. , Capponi G. - ANPA, Agenzia Nazionale per la Protezione dell'Ambiente, "Sicurezza dei reattori chimici", settore "Rischio nelle Attività industriali", 2000.
- [12] Danzi E. , Bergamo G. , Fiorentini L. , Marmo L. , 2018, "Development and Application of Fire & Explosion Risk Index Methods to Chemical Process Plants", *Chemical Engineering Transactions*, vol. **67**, pp. 217-222.
- [13] Decreto Ministero dell'Interno, *10 marzo 1998, "Criteri generali di sicurezza antincendio e per la gestione dell'emergenza nei luoghi di lavoro"*, 1998.
- [14] Normativa Europea UNI EN 1127-1, "*Atmosfere esplosive - Prevenzione dell'esplosione e protezione contro l'esplosione Parte 1: Concetti fondamentali e metodologia*", 2011.

- [15] <https://www.glob-tek.it/index.php/it/rischio-esplosione/53-sorgenti-di-innesco-atmosfere-esplosive> (data di ultima consultazione 09/2020)
- [16] B. Basso, F. Bellamino, C. Carpegna, M. Alviano, S. Iannello, 2015, "*La prevenzione delle esplosioni da polvere - caso studio: le attività molitorie*".
- [17] Baldissin M., 2015, "*Misure per prevenire la formazione di atmosfere esplosive - INERTIZZAZIONE AFFIDABILITA' DEL SISTEMA DI MONTAGGIO E CONTROLLO*".
- [18] [http://www.openfisica.com/fisica\\_ipertesto/openfisica4/carica.php](http://www.openfisica.com/fisica_ipertesto/openfisica4/carica.php) (data di ultima consultazione 09/2020)
- [19] Commissione europea, "*Guida non vincolante di buone prassi per l'attuazione della direttiva 2013/35/UE relativa ai campi elettromagnetici, volume 1: guida pratica*", 2014.
- [20] D.P.R. 461/01, Decreto del Presidente della Repubblica, "*Regime di verifica degli impianti a terra*", n°462, 2001.

## 10. Ringraziamenti

Il lavoro di Tesi rappresenta la conclusione sia di un percorso scolastico sia di vita. Sono riuscita a raggiungere questo traguardo grazie al sostegno di molte persone che hanno reso molto importante questo periodo.

Ringrazio il mio relatore, Prof. Luca Marmo, ed il dottorando, Ing. Enrico Danzi, che mi hanno consigliata ed aiutata a terminare il lavoro. Ringrazio anche la Società Tecs S.r.l. per avermi concesso la possibilità di sviluppare il lavoro di Tesi all'interno della loro realtà lavorativa. In particolar modo, ringrazio l'Ing. Marta Farinella e l'Ing. Maria Lappano, per la loro disponibilità e per le informazioni che mi hanno sempre repentinamente fornito, e il direttore esecutivo Ing. Luca Fiorentini, che mi ha accettato come tesista nella Sua società.

Ringrazio tutta la mia famiglia: i miei genitori, mio fratello Fabio e i nonni. Grazie per avermi lasciato scegliere ciò che desideravo e per i consigli che mi avete sempre dato. Grazie per essermi sempre stati vicino e per avermi aiutato a superare anche i periodi più duri e difficili, sostenendomi sempre e facendomi ritrovare ogni volta l'energia e la grinta di andare avanti.

Ringrazio i miei compagni di corso Ylenia, Serena e Gaetano sia per avermi sopportato per intere giornate sia per le memorabili esperienze e serate che abbiamo trascorso insieme. Ringrazio anche i compagni di corso Giacomo e Gabriele, che ho avuto modo di conoscere meglio nel corso della magistrale.

Ringrazio i miei amici del collegio, con i quali ho condiviso delle bellissime serate. Inoltre, mi hanno "aperto un nuovo mondo", facendomi capire che alcune mie convinzioni erano davvero assurde e dovute ad una mancata analisi dettagliata delle le informazioni ricevute.

Ringrazio tutti i miei amici di Alba. In particolare, Eleonora, Sara F. e Federica per essere sempre state presenti e per tutte le vacanze che abbiamo organizzato insieme. Ringrazio anche Lisa e Michela per le belle serate al bar e le camminate in montagna e al mare che ogni tanto facciamo tutte insieme.

Ringrazio il mio gruppo "del sabato sera", per avermi sempre sopportato ed invogliato ad uscire anche quando non ne avevo molta voglia. Ringrazio in particolar modo Sara C., per essere riuscita a mantenere con me un rapporto speciale anche se abbiamo avuto vite completamente diverse.

Infine, ma non per ultimo d'importanza, dato che un ultimo ringraziamento ci sarà sempre, ringrazio il mio gruppo musici e sbandieratori Terre Sabaude. Suonare il tamburo è sempre stato un grandissimo svago che ho condiviso con delle persone la cui amicizia va oltre al gruppo. Il mio ringraziamento è per ogni singola persona che ha fatto e che fa parte del gruppo, dato che tutti mi hanno sempre sostenuto ed accettato il "prima di tutto sono una studentessa universitaria". Grazie per le bellissime uscite e per tutti i campionati e le gare che abbiamo affrontato, grazie per aver sempre accettato la mia presenza dubbia in ogni campionato e per aver confidato nella mia organizzazione università-tamburo.