

Esercizio 1.

Si analizzi l'impianto indicato in figura 1 col metodo FMEA e si individuino gli eventi iniziatori e le relative sequenze incidentali.

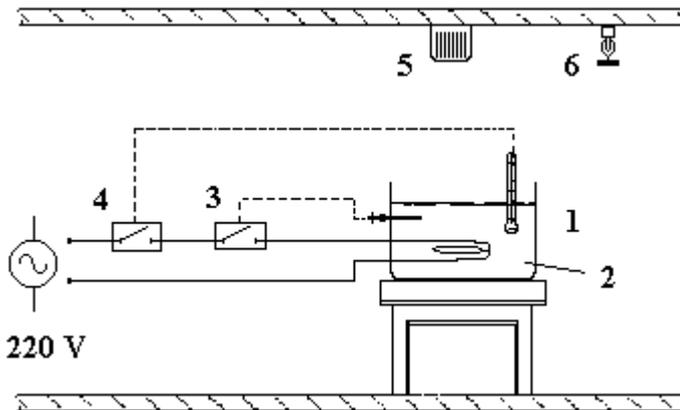


Fig. 1 – Schema dell'impianto:
 (1) Friggitrice elettrica; (2) Olio;
 (3) Termostato; (4) Interruttore
 alta Temperatura; (5) Rilevatore
 Fumo; (6) Sprinkler.

Il metodo FMEA (Failures Modes and Effects Analysis) è un metodo qualitativo che mira all'individuazione dei modi di guasto di un sistema, degli effetti provocati dai suddetti, nonché di quei componenti la cui rottura può generare una sequenza incidentale (Top Event). Si individuano, per le conseguenze, quattro gradi di pericolosità:

I = trascurabile; (nessun effetto sostanziale sul sistema)

II = marginale; (effetto sul sistema senza conseguenze sugli operatori e popolazione)

III = critica; (effetto sul sistema che può portare a conseguenze su operatori e popolazione)

IV = severa. (effetto sul sistema che porta conseguenze su operatori e popolazione)

L'analisi si sviluppa come illustrato nella seguente tabella:

Componente	Modo di guasto	Effetti sul sistema	Effetti su altri componenti	Classe	Manifestazione del Guasto
Alimentazione elettrica	Assenza di elettricità	Degrado del processo produttivo	I componenti non funzionano	I	Diminuzione temperatura olio
Vasca della friggitrice	Foratura	Degrado del processo produttivo	Nessun effetto	I	Perdita di olio
Termostato	Bloccaggio in posizione aperta	Degrado del processo produttivo	Nessun effetto	I	Diminuzione temperatura olio
//	Bloccaggio in posizione chiusa	Degrado e arresto del processo produttivo	Entrata in funzione dello Interruttore (4)	III	Aumento temperatura olio
Interruttore alta temperatura	Bloccaggio in posizione aperta	Degrado del processo produttivo	Nessun effetto	I	Diminuzione temperatura olio
Interruttore alta temperatura	Bloccaggio in posizione chiusa	Degrado e arresto del processo produttivo	possibile danno ai componenti	III	Aumento critico temperatura olio
Rilevatore di fumo	Sensore fuori uso	Nessuno a regime	Nessun effetto	I	Nessuno a regime
Sprinkler	Sensore fuori uso	Nessuno a regime	Nessun effetto	I	Nessuno a regime

In conclusione l'unico componente di questo impianto la cui rottura può generare una sequenza incidentale e pertanto può essere considerata come Top Event, è il bloccaggio in posizione chiusa del termostato (3).

Esercizio 2.

Sapendo che la probabilità di essere feriti da proiettili, generati da un impulso di pressione è del 31% per un valore d'impulso di 37.5 [Pa • s] e del 86% per un valore dell'impulso di 49.7 [Pa • s], si calcoli a che distanza si ha una probabilità del 90% di essere feriti da proiettili a causa dell'esplosione di 10 Kg di TNT .

I valori della Probit relativi alle probabilità del 31% e del 86% di essere feriti, dalla tabella 9.12 della scheda n°1, risultano rispettivamente pari a 4.5 ed a 6.08. Da questi si può risalire ai due parametri della Probit nel seguente modo:

$$4.5 = K_1 + K_2 \ln 37.5 ; 6.08 = K_1 + K_2 \ln 49.7$$

Da cui si ricavano $K_1 = -15.2$; $K_2 = 5.45$; L'equazione della Probit sarà:

$$Pr = -15.2 + 5.45 \ln J \quad \text{con } J [\text{Pa} \cdot \text{s}] = \text{Impulso}$$

Da tabella 9.12 in appendice A, il valore della Probit di essere feriti al 90% è pari a 6.28, da cui si ha un valore dell'impulso J pari a:

$$6.28 = -15.2 + 5.45 \ln J : J = 51.48 [\text{Pa} \cdot \text{s}]$$

Per risalire alla distanza incognita del problema si utilizza il grafico 2-45 in appendice A, dove sia l'impulso che la distanza sono in scala rispetto alla radice cubica della massa. il valore in scala dell'impulso J_s rispetto alla radice cubica della massa d'esplosivo è:

$$W = \text{massa di esplosivo} = 10 [\text{Kg}] ; \\ W^{1/3} = 2.14 [\text{Kg}^{1/3}] \text{ da cui } J_s = J / W^{1/3} = 24.05 [\text{Pa} \cdot \text{s} / \text{Kg}^{1/3}]$$

Dal grafico 2-45 distanza scalata è : $Z_s = 8 [\text{m} / \text{Kg}^{1/3}]$ da cui la distanza incognita del problema:

$$Z = Z_s / W^{1/3} = 17.2 [\text{m}]$$

Esercizio 3.

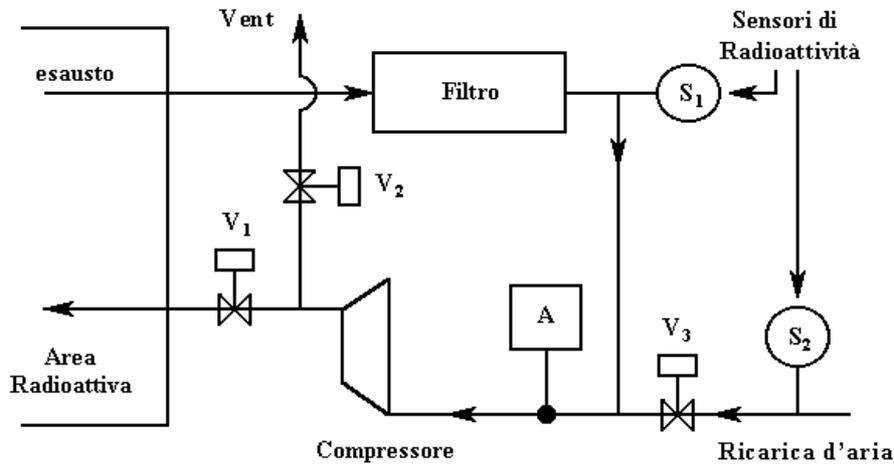


Fig. 2 – Schema di impianto di aerazione

Fig. 2 – Schema di impianto di aerazione

Dato lo schema di figura 2, eseguire un'analisi HAZOP considerando il flusso d'aria nel nodo A del circuito di aerazione di una cella contenente materiale radioattivo, sapendo che, delle tre valvole motorizzate V₁, V₂, e V₃ a regime solo la valvola V₁ è aperta.

La tecnica HAZOP (Hazard and Operability Analysis) è una procedura che mira ad individuare i fattori critici di un impianto, i problemi che potrebbero comprometterne la funzionalità (anche in termini di produttività).

Da un punto di vista operativo, se uno dei due sensori (S₁ o S₂) segnala presenza di radioattività, la valvola V₂, che a regime è chiusa, rimane tale ed il compressore viene arrestato. Inoltre le due valvole V₂ e V₃ sono utilizzate allo scopo di mantenere costante il ΔP a monte ed a valle del filtro per non comprometterne l'efficienza (e non filtrare adeguatamente l'aria).

Verranno analizzate cause, conseguenze ed azioni da intraprendere, come la tecnica HAZOP prescrive, utilizzando le parole – chiave della procedura (Nessun, Inverso, Più, Meno, Più che) per le deviazioni dal normale esercizio, del parametro “Flusso d'aria nel punto A” riportate di seguito:

- Nessun Flusso ;
- Flusso Inverso ;
- Più flusso;
- Meno flusso;
- Più che (Più radioattività di quanto prescritto) .

La parola chiave “Parte di” indicativa, per l'impianto in esame, di una variazione della composizione del flusso d'aria nel punto A non è stata presa in considerazione perché è sostanzialmente priva di significato per il caso in oggetto.

Nessun Flusso

Causa : rottura del compressore

Conseguenza : assenza di aerazione del locale

Azione : nessuna

Più Flusso

Causa 1 : errata regolazione del compressore

Conseguenza 1 : diminuzione dell'efficienza del filtro

Azione 1 : correzione flusso pompato

Causa 2 : V_3 aperta

Conseguenza 2 : graduale aumento della ΔP del filtro con possibile diminuzione della sua efficienza.

Azione 2 : chiusura V_3

Causa 3 : Filtro danneggiato

Conseguenza 3 : possibile reintroduzione di Radioattività nel locale

Azione 3 : arresto del compressore e chiusura della valvola V_1

Più radioattività di quanto prescritto

Causa : filtro non funzionante

Conseguenza : accumulo di radioattività nel locale

Azione : arresto del compressore e chiusura della valvola V_1 e sostituzione del filtro

Flusso Inverso

Causa : nessuna plausibile

Conseguenza : nessuna

Azione : nessuna

Meno Flusso

Causa 1 : errata regolazione del compressore

Conseguenza 1 : insufficiente aerazione del locale

Azione 1 : correzione della regolazione Del compressore

Causa 2 : filtro intasato

Conseguenza 2 : insufficiente aerazione

Azione 2 : si arresta il compressore si chiude la valvola V_1 e si sostituisce il filtro.

Esercizio 4

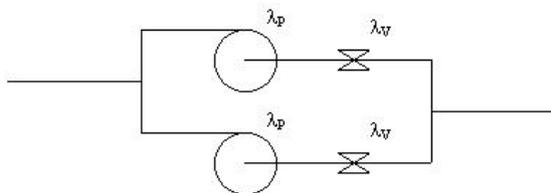


Fig. 3 – Linea di circuito idraulico

Si consideri la seguente linea di circuito idraulico in figura 3 ,sapendo che i ratei di guasto, misurati in $[Y^{-1}]$, sono $\lambda_v = \text{cost.}$ per le due valvole e $\lambda_p = \text{cost.}$ per le due pompe, calcolare:

- la legge di variazione nel tempo dell'affidabilità
- il MTBF del sistema confrontandolo con quello relativo ad un sistema formato soltanto da una linea (valvola – pompa).

Tenendo presente che l'affidabilità $R(t)$ di un sistema che possiede rateo di guasto $\lambda(t)$ è :

$$R(t) = e^{-\int \lambda(t) dt}$$

la legge di variazione nel tempo dell'affidabilità $R_S(t)$, della serie valvola – pompa risulta:

$$R_S(t) = e^{-\int_0^t \lambda_V dt} e^{-\int_0^t \lambda_P dt} = e^{-(\lambda_V + \lambda_P)t}$$

L'affidabilità $R_P(t)$ del parallelo delle due serie $R_S(t)$ è $R_P(t) = R_S(t) + R_S(t) - [R_S(t)]^2 = 2R_S(t) - [R_S(t)]^2$, pertanto si avrà:

$$R_P(t) = 2e^{-\int_0^t (\lambda_V + \lambda_P) dt} - e^{-2\int_0^t (\lambda_V + \lambda_P) dt} = 2e^{-(\lambda_V + \lambda_P)t} - e^{-2(\lambda_V + \lambda_P)t}$$

Ricordando che per definizione il MTBF è definito:

$$MTBF = \int_0^{\infty} R(t) dt$$

Per la serie si avrà:

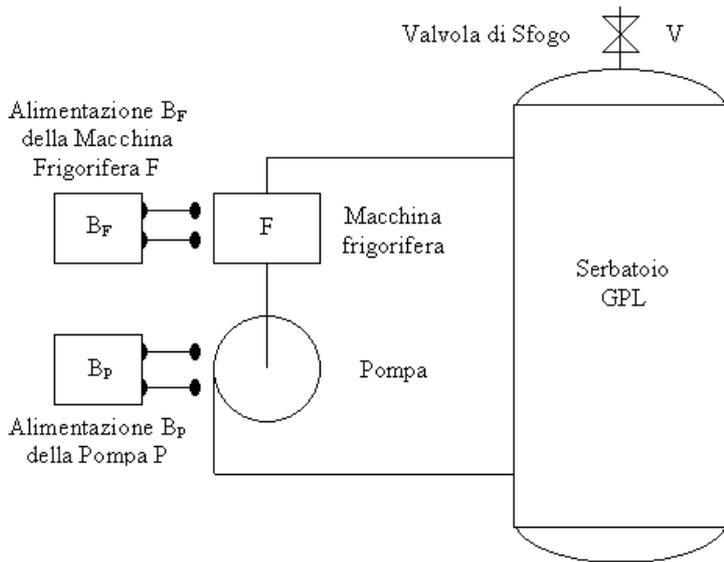
$$MTBF_S = \int_0^{\infty} R_S(t) dt = \int_0^{\infty} e^{-(\lambda_V + \lambda_P)t} dt = \frac{1}{\lambda_V + \lambda_P}$$

Per il parallelo:

$$MTBF_P = \int_0^{\infty} R_P(t) dt = \int_0^{\infty} [2e^{-(\lambda_V + \lambda_P)t} - e^{-2(\lambda_V + \lambda_P)t}] dt = \frac{3}{2(\lambda_V + \lambda_P)}$$

ciò significa che $MTBF_P = 1.5 MTBF_S$.

Esercizio 5.



- Dati
- Rateo di guasto di V , $\lambda_V = 5 \cdot 10^{-2} [Y^{-1}]$
 - Rateo di guasto di F , $\lambda_F = 10^{-2} [Y^{-1}]$
 - Rateo di guasto di B_F , $\lambda(B_F) = 10^{-1} [Y^{-1}]$
 - Rateo di guasto di P , $\lambda_P = 10^{-1} [Y^{-1}]$
 - Rateo di guasto di B_P , $\lambda(B_P) = 10^{-1} [Y^{-1}]$

Fig. 4 – Serbatoio di GPL liquefatto per temperatura

Si abbia un serbatoio, come in figura, contenente GPL liquefatto per temperatura, dotato di valvola di sfogo V e refrigerato da un sistema costituito da una macchina frigorifera F alimentata da una batteria B_F e da un sistema di pompaggio realizzato mediante una pompa P alimentata da una batteria B_P.

Si consideri come Top – Event la rottura del serbatoio (in eventi / anno) e si costruisca il grafico dell’albero dei guasti determinando la frequenza del Top – Event col metodo dei Minimal Cut Sets (MCS).

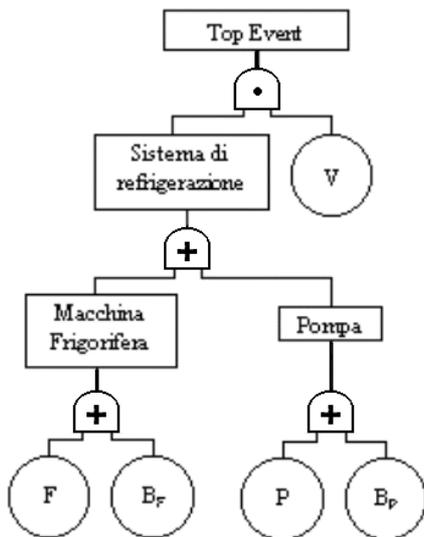


Fig. 5 – Albero dei Guasti riferito al Serbatoio di GPL di figura 4 in cui si considera come Top Event la sua rottura catastrofica

$$T.E. = V (F + P + B_F + B_P)$$

$$T.E. = V \cdot F + V \cdot P + V \cdot B_F + V \cdot B_P$$

$$T.E. = 5 \cdot 10^{-2} \cdot 10^{-2} + 5 \cdot 10^{-2} \cdot 10^{-1} + 5 \cdot 10^{-2} \cdot 10^{-1} + 5 \cdot 10^{-2} \cdot 10^{-1}$$

$$T.E. = 5 \cdot 10^{-4} + 5 \cdot 10^{-3} + 5 \cdot 10^{-3} + 5 \cdot 10^{-3}$$

$$T.E. = 2.05 \cdot 10^{-2}$$

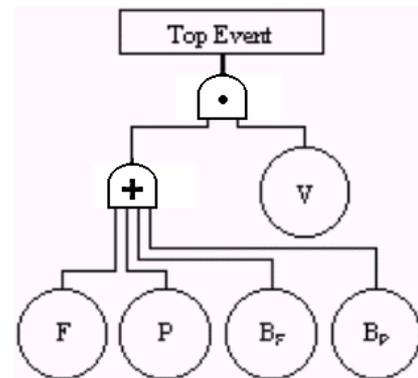


Fig. 6 – Albero dei Guasti semplificato, riferito al Serbatoio di GPL di figura 4 in cui si considera come Top Event la sua rottura catastrofica

Analizzando lo schema di figura 4 ed applicando il metodo dell'Albero dei Guasti, si costruisce lo schema di figura 5, mediante il quale si effettua l'analisi logica che permette di determinare i cut – sets individuando gli eventi più significativi in termini di frequenza di accadimento. Effettuando l'analisi logica and – or sull'Albero dei Guasti in oggetto si avrà:

Esercizio 6.

Lo studio di Rischio di un'area industriale ha portato all'individuazione degli incidenti riportati in Tabella in termini di Probabilità e Conseguenze.

Rischio	Probabilità	Conseguenze (Num. morti)
R_1	$Pr_1 = 10^{-6}$	$C_1 = 0.02 \cdot 10^2$
R_2	$Pr_2 = 10^{-6}$	$C_2 = 0.5 \cdot 10^2$
R_3	$Pr_3 = 10^{-9}$	$C_3 = 10^2$
R_4	$Pr_4 = 10^{-8}$	$C_4 = 2 \cdot 10^2$
R_5	$Pr_5 = 10^{-11}$	$C_5 = 10^3$
R_6	$Pr_6 = 10^{-13}$	$C_6 = 10^4$

Si realizzi il grafico del Rischio Sociale relativo all'area in oggetto e si discutano i criteri di accettabilità sia del Rischio individuale che di quello Sociale in relazione ai risultati ottenuti.

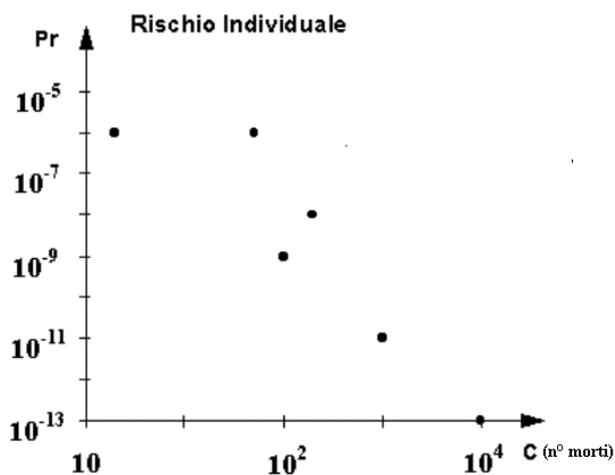


Fig. 7 – grafico del Rischio Individuale

Il grafico del Rischio Individuale riportando i valori in Tabella risulta come in figura 7.

Per costruire il grafico relativo al Rischio Sociale, bisogna costruire il grafico della Probabilità Cumulativa in funzione delle Conseguenze (numero di morti / anno). In base ad un valore di soglia – S – (in termini di Conseguenze) la Probabilità Cumulativa è la

$$Pr_C = \sum_{N \geq S} Pr$$

Probabilità (Pr) di avere un numero di morti / anno (N) superiore al valore S fissato:

Fissando, ad esempio, il valore di $S = C_1 = 0.02 \cdot 10^2$ si avrà:

$$Pr_{C(1)}(S) = Pr_1 + Pr_2 + Pr_3 + Pr_4 + Pr_5 + Pr_6 = 2 \cdot 10^{-6}$$

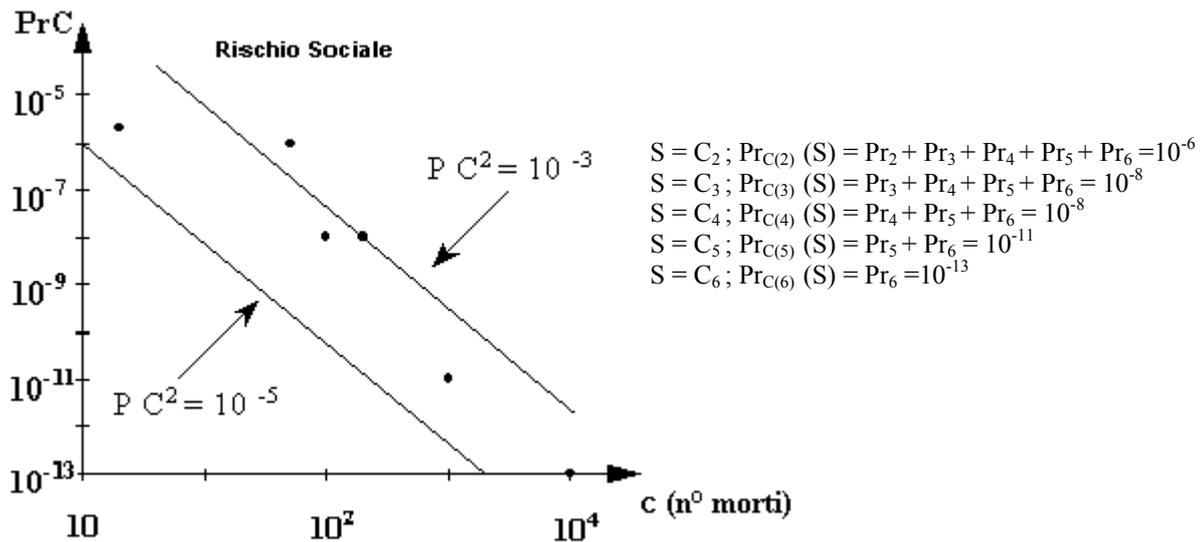


Fig. 8 – grafico del Rischio Sociale e zona di accettabilità tracciata secondo quanto prescrive il Criterio Olandese

Applicando il Criterio di Accettabilità Olandese [limite di inaccettabilità $P C^2 = 10^{-3}$; limite di accettabilità incondizionata $P C^2 = 10^{-5}$] il punto $Pr_{C(2)}(S)$ cade nella zona di Rischio Inaccettabile mentre il punto $Pr_{C(4)}(S)$ è al limite della zona di ottimizzazione (principio ALARA), i rimanenti ricadono all'interno di tale zona.

Esercizio 7.

L'affidabilità di un operatore nello svolgimento di un turno di lavoro può essere approssimata con quella di un sistema avente rateo di guasto $\lambda = a + bt$. Calcolarne la legge di variazione nel tempo e la probabilità di errore in un turno T di 8 ore (nell'ipotesi che sia $a = 0.05 \text{ h}^{-1}$ e $b = 0.05 \text{ h}^{-2}$). Supponendo che l'affidabilità dell'operatore sia approssimabile da un sistema con $\lambda = a + bt + ct^2$ (con $a = 0.05 \text{ h}^{-1}$; $b = 0.05 \text{ h}^{-2}$; $c = 0.015 \text{ h}^{-3}$), calcolare la legge di variazione nel tempo e la probabilità di errore in un turno T = 8 [h].

Tenendo presente che l'affidabilità R(t) di un sistema che possiede rateo di guasto $\lambda(t)$ è :

$$R(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt}$$

L'affidabilità dell'operatore risulta:

$$R(t) = e^{-\int_0^t (a+bt) dt} = e^{-at} + e^{-\frac{bt^2}{2}}$$

numericamente in un turno T = 8 [h] l'affidabilità dell'operatore sarà :

$$R(T) = e^{-0.05 \times 8} + e^{-0.05 \frac{8^2}{2}} = e^{-0.4} + e^{-1.5} = 0.87$$

La probabilità d'errore (ovvero l'inaffidabilità) dell'operatore sarà $Q(T) = 1 - R(T) = 0.13$.
Con $\lambda = a + bt + ct^2$ (con $a = 0.05 \text{ h}^{-1}$; $b = 0.05 \text{ h}^{-2}$; $c = 0.015 \text{ h}^{-3}$), in un turno T = 8 [h] l'affidabilità dell'operatore sarà :

$$R(t) = e^{-\int_0^t (a+bt+ct^2) dt} = e^{-at} + e^{-\frac{bt^2}{2}} + e^{-\frac{ct^3}{3}} \rightarrow R(T) = e^{-0.05 \times 8} + e^{-0.05 \frac{8^2}{2}} + e^{-0.015 \frac{8^3}{3}}$$

$$R(T) = 0.94 \rightarrow Q(T) = 0.06$$

Esercizio 8.

Sapendo che la Probit, nel caso di emorragia polmonare da esplosioni è data dalla seguente equazione:

$$Pr = -15.6 + 1.93 \ln \Delta P$$

Calcolare a che distanza si ha il 50% di probabilità di morire di emorragia polmonare nel corso di un UVCE susseguente ad una rottura catastrofica di un'autobotte contenente 10000 Kg di Propano (modello TNO medium explosive $K = 0.06$) alla pressione di 8 bar e temperatura $T_i = 20 \text{ }^\circ\text{C}$, considerando solo il contributo del flash. Si verifichi inoltre, se tale distanza è interna alla nube formatasi.

Dati del Propano: $\left\{ \begin{array}{l} \text{Calore di Combustione } h_c = 46.49 \text{ [MJ/Kg]} \\ \text{Calore di Vaporizzazione } h_{cv} = 370 \text{ [KJ/Kg]} \\ \text{Calore specifico del liquido } C_p = 2.6 \text{ [KJ/Kg } ^\circ\text{C]} \\ \text{Temperatura di ebollizione } T_{eb} = -41 \text{ [}^\circ\text{C]} \end{array} \right.$

Il valore di Probit corrispondente ad una probabilità di morire del 50 % è pari a 5 quindi:

$$\ln \Delta P = (5 + 15.6) / 1.93 = 10.67 \rightarrow \Delta P = 43,199 \text{ KPa}$$

La relazione che lega il picco di pressione ΔP alla distanza R è:

$$\Delta P / P_o = K L_o / R \text{ con } P_o = 101 \text{ KPa ed } L_o = (M_o h_c / P_o)^{1/3}$$

la massa reagente M_o è pari alla massa totale di combustibile $M = 10000$ per la frazione di liquido che vaporizza in seguito al rilascio che è $x = 1 - e^{-C_p (T_i - T_{eb}) / h_{cv}} \approx C_p (T_i - T_{eb}) / h_{cv}$ numericamente $M_o = M \cdot x = 10000 \cdot 0.43 = 4300 \text{ Kg}$, $L_o = 1407 \text{ m}$ ed R sarà uguale a:

$$R = K L_o P_o / \Delta P = 0.06 \cdot 1407 \cdot 101 / 43,199 = 197 \text{ m}$$

Essendo $R < L_o/2$ la distanza è interna alla nube.

Esercizio 9.

Determinare la distanza di sicurezza a cui deve trovarsi una persona sprovvista di indumenti protettivi per non subire conseguenze gravi a seguito di un Fire – Ball originato dalla rottura catastrofica di un serbatoio contenente 8 tonnellate di GPL. Si supponga che:

- l'intensità media della radiazione sulla superficie del Fire – Ball durante l'esplosione è di 170 KW/m^2 ;
- la durata del Fire – Ball è di 10 secondi;
- l'altezza dal suolo del centro del Fire – Ball è di 150 m;
- cautelativamente la trasmittività dell'aria ed il coefficiente di assorbimento del bersaglio sono uguali ad uno;
- la dose limite per cui si hanno gravi danni alla popolazione è di 200 KJ/m^2 .

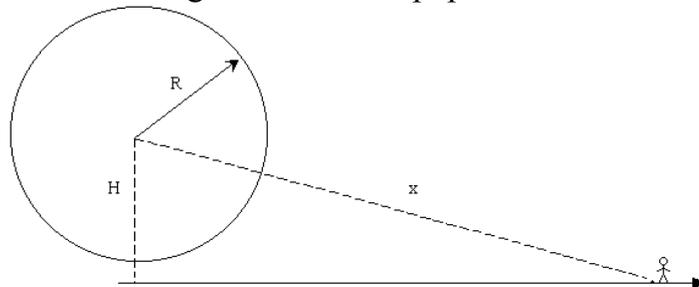


Fig. 9 – Schema di Fire – Ball con H = altezza dal suolo del centro della sfera ; R = raggio della sfera ; x = distanza del bersaglio dal centro della sfera

Gli effetti termici di una Fire – Ball possono essere valutati tramite la relazione:

$$Q_T = F \tau \alpha_T Q_S$$

Con Q_T = flusso termico sul bersaglio (W/m^2), Q_S = flusso termico sulla superficie della sorgente (W/m^2), F = fattore di vista (angolo solido secondo cui il bersaglio vede la superficie dell'incendio) τ = trasmissività atmosferica e α_T = coefficiente assorbimento del bersaglio. Nel presente problema si è imposto cautelativamente $\tau = \alpha_T = 1$.
 Nel caso di Fire – Ball il raggio R della sfera di fuoco è dato dalla relazione:

$$R = 3 M^{1/3}, \text{ ovvero } R = 3 (8000)^{1/3} = 60 \text{ m}$$

Essendo M la massa di combustibile rilasciata in Kg. Il fattore F sarà:

$$F = \pi (R/x)^2 \rightarrow x = R (\pi Q_S / Q_T)^{1/2}, \text{ con } x = \text{distanza del bersaglio.}$$

Numericamente si ha $Q_S = 170 \text{ KW}/m^2$; $Q_T = 20 \text{ KW}/m^2$ (ovvero $200 \text{ KJ}/m^2$ diviso il tempo di esposizione di 10 secondi), $x = 60 (\pi 170/20)^{1/2} = 310 \text{ m}$.

Esercizio 10.

Sapendo che all'interno di un serbatoio sono presenti 20000 Kg di una sostanza infiammabile caratterizzata da una energia di combustione per unità di massa pari 2.3 MJ/Kg, utilizzando il grafico riportato in figura 10 ed assumendo che l'energia rilasciata dall'esplosione di 1 Kg di TNT sia pari a 4.6 MJ, determinare la distanza fino alla quale l'esplosione della sostanza contenuta nel serbatoio provoca un picco di pressione $P \geq 7 \text{ KPa}$.

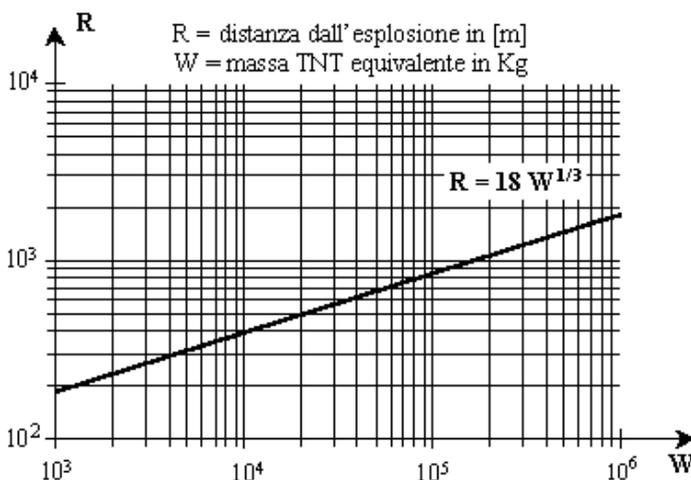


Fig. 10 – grafico dell'andamento della distanza R da un'esplosione che provoca un picco di pressione $\geq 7 \text{ KPa}$, in funzione della massa W di TNT equivalente.

Supponendo la combustione dell'intero contenuto del serbatoio (20000 Kg di sostanza infiammabile) l'energia liberata E sarà:

$$E = 20000 [\text{Kg}] \cdot 2.3 [\text{MJ}/\text{Kg}] = 46000 [\text{MJ}]$$

Se energia liberata da 1 Kg di TNT è 4.6 [MJ/Kg], la massa equivalente di TNT contenuta nel serbatoio sarà pari a:

$$W = 46000 \text{ [MJ]} / 4.6 \text{ [MJ/Kg]} = 10000 \text{ [Kg]}$$

Dal grafico (oppure dalla relazione $R = 18 W^{1/3}$) si ricava che la distanza R alla quale si ha un picco di pressione $P \geq 7\text{KPa}$ è di 388 [m].

Esercizio 11.

Dalla rottura di una tubazione di diametro $D = 5$ cm usata per il trasporto di metano in pressione esce un getto di gas che si infiamma e va a colpire un serbatoio di gas in pressione. Sapendo che:

- la portata di efflusso del metano è critica, con velocità del suono $V_S = 300$ m/s;
- la combustione del metano sviluppa $E_C = 35$ MJ/ m^3 ;
- il calore specifico del gas contenuto nel serbatoio è $c_v = 0.7$ KJ/ (Kg °C);
- il serbatoio contiene $M_G = 10000$ Kg di gas;
- la temperatura iniziale del gas contenuto nel serbatoio è 20 °C;

determinare, con ipotesi cautelative, il tempo necessario affinché la pressione del gas nel serbatoio raddoppi.

La portata G_g del gas in ipotesi di efflusso critico è ricavabile tramite la seguente relazione:

$$G_g = \pi (D/2)^2 V_S = 0.6 \text{ m}^3 / \text{s} , \text{ la cui combustione sviluppa un'energia termica}$$

$$W_C = G_g E_C = 21 \text{ MW}$$

Il contenuto del serbatoio impiega a raddoppiare la sua pressione tanto quanto impiega a raddoppiare la sua temperatura, infatti in ipotesi di gas perfetto si ha che:

$$P_1 / T_1 = P_2 / T_2 \rightarrow P_1 / P_2 = T_1 / T_2$$

L'energia necessaria a raddoppiare la temperatura ($\Delta T = 293$ K) è:

$$E_R = M_G c_v \Delta T = 2051 \text{ MJ}$$

Il tempo t_R necessario a raddoppiare la temperatura (e quindi la pressione) del gas nel serbatoio sarà pari a:

$$t_R = E_R / W_C = 98 \text{ s}$$

Esercizio 12.

Determinare il MTBF di un sistema costituito da due unità in serie aventi rateo di guasto rispettivamente λ_1 e λ_2 (costanti), poste in parallelo ad una terza unità avente rateo di guasto λ_3 (costante).

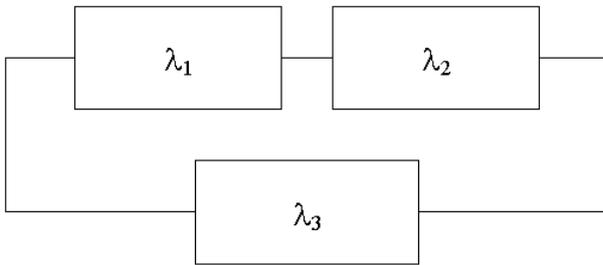


Fig. 11 – Schema di un parallelo fra una serie di due componenti ed un terzo, aventi ratei di guasto λ_1 , λ_2 e λ_3 costanti.

Le affidabilità del sistema serie $R_S(t)$ dei due componenti aventi ratei di guasto λ_1 e λ_2 e quella $R_3(t)$ del componente con rateo di guasto λ_3 , sono:

$$R_S(t) = e^{-\int_0^t \lambda_1 dt} e^{-\int_0^t \lambda_2 dt} = e^{-(\lambda_1 + \lambda_2)t}$$

$$R_3(t) = e^{-\int_0^t \lambda_3 dt} = e^{-\lambda_3 t}$$

L'affidabilità del sistema parallelo tra il terzo componente e la serie dei primi due è dato dalla relazione $R_P(t) = R_S(t) + R_3(t) - R_S(t) R_3(t)$, il $MTBF_P$ è ricavabile nel seguente modo:

$$R_P(t) = e^{-(\lambda_1 + \lambda_2)t} + e^{-\lambda_3 t} - e^{-(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3)t}$$

$$MTBF_P = \int_0^{\infty} R_P(t) dt = \frac{1}{\lambda_1 + \lambda_2} + \frac{1}{\lambda_3} - \frac{1}{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3}$$

Esercizio 13

Determinare la distanza dal centro di un deposito di esplosivi contenente 27 tonnellate di TNT, tale che un individuo sprovvisto di protezioni all'aperto che si trovi oltre tale distanza non subisca effetti gravi a seguito dall'esplosione. Si discuta il problema in generale e, per la soluzione del caso particolare, si supponga che:

- la sovrappressione per cui si hanno danni gravi alla popolazione sia 40 KPa;
- considerata tale sovrappressione, il coefficiente della legge che lega la distanza alla massa di TNT sia pari ad 8.

Dato un picco di pressione, la relazione che lega la distanza alla quale si ha un ΔP maggiore del valore di picco considerato, in funzione della massa di TNT equivalente è $R = a W^{1/3}$.

In figura 11 è riportato l'andamento (lineare in scala logaritmica), della distanza R in funzione della massa W di TNT equivalente, per il caso in esame si è preso a riferimento un picco di pressione ΔP pari a 40 KPa, il coefficiente "a" della precedente relazione è dato uguale a 8, ne segue che per una massa W di 27000 Kg di TNT equivalente si ha:

$$R = 8 (27000)^{1/3} = 270 \text{ m}$$

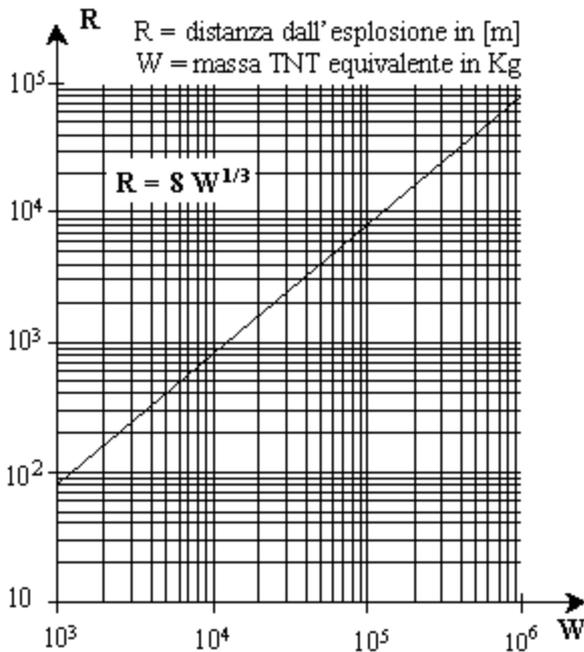


Fig. 12 – grafico dell'andamento della distanza R da un'esplosione che provoca un picco di pressione ≥ 40 KPa, in funzione della massa W di TNT equivalente.

Esercizio 14.

All'interno di un deposito di carburanti è presente una vasca di contenimento circolare in calcestruzzo di raggio $R = 10$ m, che consente di contenere l'eventuale sversamento di idrocarburi da un serbatoio fuori terra.

Assumendo che nel caso di incendio di tale pozza il flusso termico sulla superficie della fiamma sia di 40 KW/m^2 ed ipotizzando completa assenza di vento, con l'ausilio della tabella data nel seguito valutare a quale distanza minima dal bordo della vasca deve essere posizionata una valvola di intercettazione affinché questa possa essere manovrata senza danni per la salute da un operatore sprovvisto di indumenti protettivi (sapendo che la manovra richiede un tempo di esecuzione di 10 secondi e che per raggiungere la valvola da una postazione protetta di sicurezza, che sarà collocata a 5 metri di distanza dalla valvola, l'operatore si muoverà ad una velocità di 1 m/s). Nella risoluzione del problema approssimare la forma della sorgente termica a quella di una semi sfera di raggio $R = 10$ m.

Q [KW/m ²]	T [s]	Effetti
4	Grande (> 1 min)	Flusso Termico di sicurezza per l'uomo
12.6	Grande (~ 1 min)	Flusso Termico che produce incendi secondari
6.5	~ 20 s	Bruciatura della pelle
11	~ 10 s	Bruciatura della pelle
20	~ 5 s	Bruciatura della pelle

Avendo un flusso termico di 40 KW/m^2 dai valori in tabella si può prevedere che la distanza di sicurezza per l'operatore sarà superiore al diametro della pozza che potrà essere considerata, con buona approssimazione, di forma semi – sferica.

Riferendosi alla figura 13, l'operatore, una volta uscito dalla postazione P, alla velocità di 1 m/s percorre 5 m fino a raggiungere la valvola di intercettazione V, poi permane per 10 secondi alla distanza D_V dalla pozza per manovrare la valvola.

In queste condizioni affinché l'operatore prima arrivi alla valvola e poi sia in condizioni di manovrarla, la somma dei due contributi alla dose termica assorbita (percorso postazione – valvola e sosta per la manovra) dovrà essere inferiore a 4 KW/m^2 (vedi tabella).

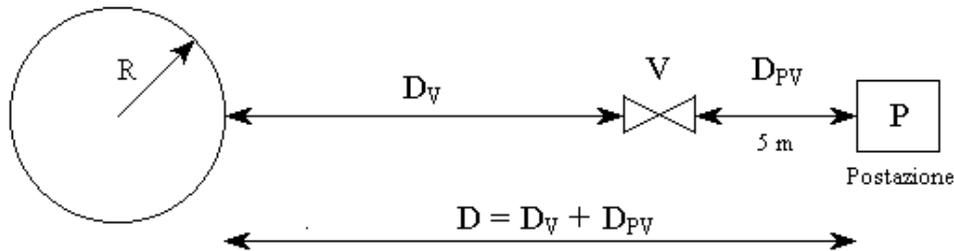


Fig. 13 – Disegno (non in scala) del serbatoio circolare di raggio R, valvola di intercettazione V, postazione P dell'operatore, distanza D_V della valvola dal serbatoio, distanza D_{PV} postazione – valvola

La legge di attenuazione della radiazione termica da una sorgente sferica in funzione della distanza x tra operatore (considerato puntiforme) e sorgente, ponendo cautelativamente la trasmissività dell'atmosfera (τ) ed il coefficiente di assorbimento del bersaglio (α_T) pari ad uno, è data dalla seguente relazione:

$$Q_T = F \tau \alpha_T Q_S$$

con Q_T = flusso termico sul bersaglio ; Q_S = flusso termico della sorgente.

Supponendo cautelativamente che l'operatore soste 15 secondi a distanza D_V dalla sorgente di calore e che il flusso termico di sicurezza per l'uomo è 4 KW/m^2 si avrà:

$$Q_T / Q_S = F ; F_{(SFERA)} = \pi (R / D_V)^2 \rightarrow F_{(SEMI SFERA)} = 1/2 \pi (R/x)^2$$

Numericamente si ha:

$$D_V = R [(\pi/2) (Q_S / Q_T)]^{1/2} = 10 [(\pi/2)(40 / 4)]^{1/2} = 40 \text{ m}$$

Esercizio 15.

Un sistema è costituito da due attrezzature in serie aventi rateo di guasto rispettivamente $r_1 = a_1 + m t$ ed $r_2 = a_2 + m t$ con $a_1 = 0.01 \text{ h}^{-1}$, $a_2 = 0.02 \text{ h}^{-1}$ ed $m = 0.01 \text{ h}^{-2}$.

Calcolare la legge di variazione nel tempo dell'affidabilità del sistema e la probabilità di guasto per un tempo di missione di 10 ore.

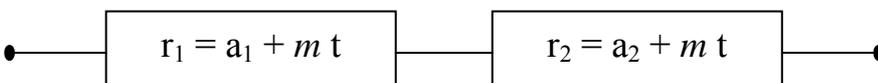


Fig. 14 – Sistema serie di due componenti aventi affidabilità r_1 ed r_2 .

L'affidabilità del sistema serie $R_S(t)$ è data dal prodotto delle affidabilità dei due sistemi :

$$R_S(t) = e^{-\int_0^t r_1 dt} e^{-\int_0^t r_2 dt} = e^{-\int_0^t (a_1+mt) dt} e^{-\int_0^t (a_2+mt) dt}$$

$$R_S(t) = e^{-mt^2 - (a_1+a_2)t}$$

In un intervallo di 10 ore la affidabilità del sistema risulta $R_S(t) = 0.27$ ne segue che l'inaffidabilità de sistema $Q_S(t) = 1 - R_S(t) = 0.83$.

Esercizio 16.

Utilizzare il metodo dell'Albero degli Eventi per valutare la probabilità di rischio annua di un impianto di respirazione artificiale per mancanza di alimentazione elettrica sapendo che questa è fornita da:

- rete ENEL che, con contratto speciale, garantisce il servizio con un rateo di guasto di 1/anno
- un diesel-generatore, che entra in funzione automaticamente se manca l'alimentazione dalla rete, con una indisponibilità di 0.05/domanda
- un sistema di batterie-inverter, che viene azionato su comando di un operatore (probabilità di errore 0.01) ed ha una indisponibilità intrinseca di 0.01/domanda.

Riferendosi alla figura 15, gli eventi possibili che hanno come evento iniziatore la mancanza di elettricità dalla rete sono:

EVENTO A = Mancanza di alimentazione elettrica ed entrata in funzione del Diesel – generatore;

EVENTO B = Mancanza di alimentazione elettrica non entrata in funzione del Diesel – generatore, attivazione del sistema di batterie;

EVENTO C = Mancanza di alimentazione elettrica non entrata in funzione del Diesel – generatore e mancata attivazione del sistema di batterie.

	DIESEL – GENERATORE		EVENTO A
EVENTO INIZIATORE	SI		
		BATTERIE – INVERTER	EVENTO B
MANCANZA ALIMENTAZ. ELETTRICA	NO	SI	
		NO	EVENTO C

Il rateo di guasto dell'intero sistema, considerando l'EVENTO C, risulta $\lambda_S = 5 \cdot 10^{-4}$ /anno. L'affidabilità del sistema è $R_S(t) = e^{-\lambda_S t}$; in un anno la probabilità di fallimento dell'intero sistema sarà $Q_S(\text{anno}) = 1 - R_S(\text{anno}) = 5 \cdot 10^{-4}$.

Esercizio 17.

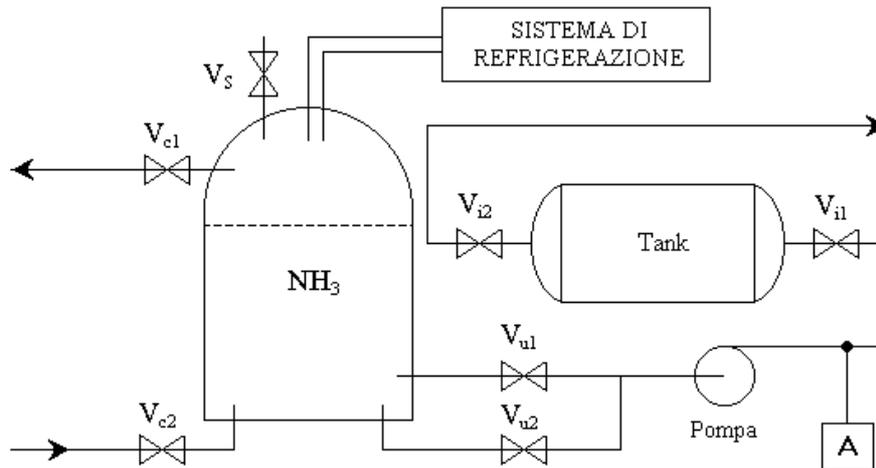


Fig. 16 – Schema di impianto di stoccaggio e distribuzione di ammoniaca.

Si consideri l'impianto di stoccaggio e distribuzione di ammoniaca di figura 16 formato da un serbatoio (S) refrigerato, dotato di valvola di sicurezza V_S e di un sistema di carico costituito da due linee in fase liquida e vapore controllate dalle due valvole V_{c1} e V_{c2} . Il sistema di distribuzione è formato da due linee, controllate dalle due valvole V_{u1} e V_{u2} , che portano l'ammoniaca alla pompa (P) la quale carica il Tank pressurizzato (T) intercettato dalle valvole V_{i1} e V_{i2} .

Si consideri l'impianto in fase di carico sia del serbatoio (S) che del Tank (T), con V_{c1} e V_{c2} aperte, sistema di refrigerazione in funzione, V_{u1} aperta e V_{u2} chiusa, pompa (P) in funzione, V_{i1} aperta e V_{i2} chiusa.

Effettuare un'analisi FMEA considerando il serbatoio ed il sistema di carico e le valvole V_{u1} e V_{u2} , in seguito eseguire un'analisi HAZOP considerando la portata di ammoniaca a valle della pompa (P) (nodo A in figura 16), infine costruire:

- l'albero degli eventi, considerando come evento iniziatore la rottura della mandata della pompa;
- l'albero dei guasti con Top Event la rottura catastrofica del serbatoio refrigerato.

Fissando, per le conseguenze, quattro classi di pericolosità l'analisi FMEA si sviluppa come di seguito illustrato:

- I = trascurabile; (nessun effetto sostanziale sul sistema)
- II = marginale; (effetto sul sistema senza conseguenze sugli operatori e popolazione)
- III = critica; (effetto sul sistema che può portare a conseguenze su operatori e popolazione)
- IV = severa. (effetto sul sistema che porta conseguenze su operatori e popolazione)

Componente	Modo di guasto	Effetti sul sistema	Effetti sugli altri componenti	Classe	Manifestazione del Guasto
Serbatoio	Foratura in fase vapore	Formazione di una nube tossica	Nessun effetto	IV	Diminuzione della pressione interna del serbatoio
//	Foratura in fase liquida	Formazione di una pozza e di una nube tossica	Cavitazione della pompa	IV	Presenza di ammoniaca in fase liquida all'esterno del serbatoio
Sistema di Refrigerazione	rottura	Aumento della temperatura dell'ammoniaca	Entrata in funzione di V_S	III	Aumento di pressione all'interno del serbatoio
Valvola V_{c1}	Bloccaggio in posizione aperta (finito il carico)	Nessun effetto	Nessun effetto	I	Diminuzione di pressione all'interno del serbatoio a
//	Perdita	Formazione di una pozza e di una nube tossica	Nessun effetto	IV	Presenza di nube di ammoniaca all'esterno del serbatoio
Valvola V_{c2}	Bloccaggio in posizione aperta (finito il carico)	Nessun effetto	Nessun effetto	II	Lieve aumento del livello di ammoniaca liquida
Valvola V_{c2}	Perdita	Formazione di una pozza e di una nube tossica	Nessun effetto	IV	Presenza di ammoniaca in fase liquida all'esterno del serbatoio
Valvola V_{u1}	Bloccaggio in posizione aperta (finito il carico)	Nessun effetto	Nessun effetto	I	Sensori
//	Perdita	Formazione di una pozza e di una nube tossica	Possibile cavitazione della pompa	IV	Presenza di ammoniaca in fase liquida all'esterno del serbatoio
Valvola V_{u2}	Bloccaggio in posizione chiusa	Nessun effetto	Nessun effetto	I	Sensori
//	Perdita	Formazione di una pozza e di una nube tossica	Possibile cavitazione della pompa	IV	Presenza di ammoniaca in fase liquida all'esterno del serbatoio
Valvola V_S	Valvola fuori uso	Nessun effetto durante il carico	Nessun effetto	II	Nessuno durante il carico

La tecnica HAZOP si effettuerà analizzando cause, conseguenze ed azioni da intraprendere, per le deviazioni dal normale esercizio durante l'operazione di carico dell'ammoniaca, del parametro "Flusso di NH₃ a valle della pompa", utilizzando le seguenti parole – chiave della procedura: Nessun, Inverso, Più, Meno, Parte di. La parola chiave "Più che" indicativa, per l'impianto in esame, di presenza di impurità nel flusso di NH₃ a valle della pompa, non è stata presa in considerazione perché è sostanzialmente priva di significato per il caso in oggetto. Le deviazioni dal normale esercizio saranno le seguenti:

- Nessun Flusso ;
- Più flusso del necessario ;
- Meno flusso del necessario ;
- Flusso Inverso;
- Parte di flusso dell'ammoniaca in stato bifase.

Nessun Flusso

Causa : blocco della pompa

Conseguenza : operazione di carico del Tank non completa

Azione : nessuna

Più Flusso del necessario

Causa : errata regolazione della pompa

Conseguenza : portata di NH₃ eccessiva

Azione : correzione flusso pompato

Parte di flusso dell'ammoniaca in stato bifase

Causa : variazioni delle condizioni termodinamiche dell'Ammoniaca (surriscaldamento)

Conseguenza : possibile danneggiamento della pompa

Azione : chiusura delle valvole e V_{u1} e V_{i1} .

Meno Flusso del necessario

Causa 1 : errata regolazione della pompa

Conseguenza 1 : operazione di carico del Tank rallentata

Azione 1 : correzione della regolazione della pompa.

Causa 2 : valvola V_{u1} non completamente aperta

Conseguenza 2 : operazione di carico del Tank rallentata

Azione 2 : correzione del grado di apertura della valvola

Flusso inverso

Causa : rottura della mandata della pompa

Conseguenza : formazione di una pozza e nube di ammoniaca

Azione : chiusura delle valvole V_{u1} e V_{i1}

L'albero dei guasti illustrato In figura 17, è dato, considerando come top event la rottura catastrofica del serbatoio, dalla concomitanza della rottura del sistema di refrigerazione e dal blocco , in posizione chiusa, della valvola di sicurezza V_S.

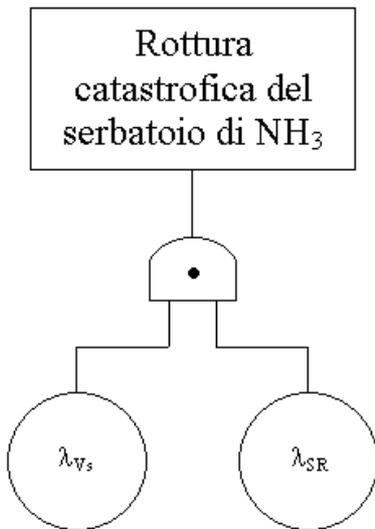


Fig. 17 – Albero dei Guasti relativo all’impianto di figura 16.

Si è indicato con λ_{Vs} e λ_{SR} i ratei di guasto relativi rispettivamente alla valvola V_S ed al Sistema di Refrigerazione.

L’albero degli eventi relativo allo schema di figura 16, considerato come evento iniziatore la rottura della mandata della pompa è illustrato in figura 18.

Nel caso si verifici quest’evento, il contenuto del serbatoio refrigerato è destinato a fuoriuscire se la valvola V_{u1} non chiude. Inoltre nel caso la pompa sia danneggiata in modo da non garantire la tenuta, dovrà chiudere anche la V_{i1} così da evitare che il contenuto del tank pressurizzato si sversi.

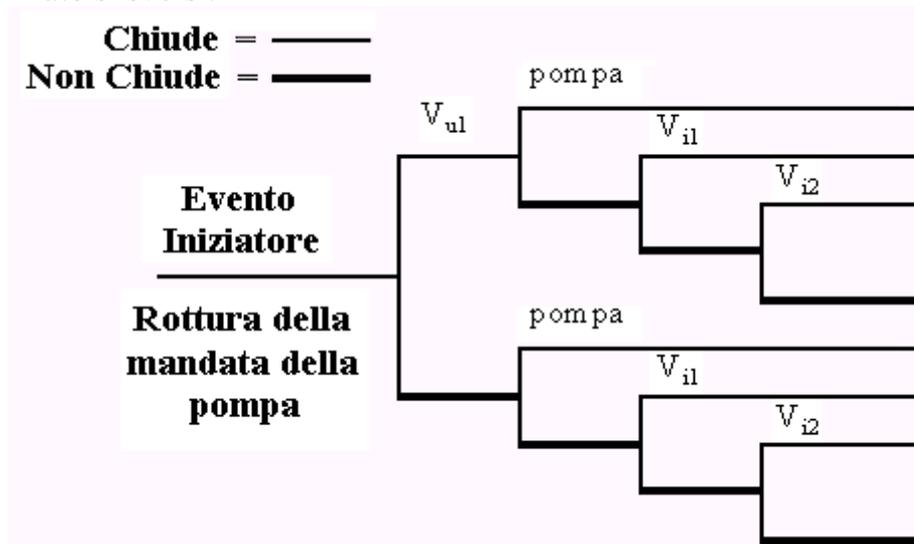


Fig. 18 – Albero degli Eventi relativo all’impianto di fig. 16.

Nel caso V_{u1} non si chiuda, la pompa non deve avere perdite (anche se non è improbabile che rimanga danneggiata dall’improvvisa perdita di carico); se la pompa non riesce ad bloccare la fuoriuscita di NH_3 , deve chiudersi la valvola di intercettazione V_{i1} . Se pure la V_{i1} fallisce il contenuto del tank pressurizzato fuoriuscirà incrementando la quantità di ammoniaca sversata. Infine, per isolare la linea di distribuzione deve chiudersi la V_{i2} , se ciò non dovesse verificarsi la quantità di ammoniaca riversata all’esterno sarebbe ancora maggiore.