

ANALISI DEL RISCHIO DI OVERFLOW DAI SERBATOI DI UN DEPOSITO COSTIERO

A. C. Benvenuto

**STUDIO DI INGEGNERIA
BENVENUTO**

16128 Genova - via Corsica, 6/5A - tel. / fax 010562207 / 010543587

1. SOMMARIO

Oggetto della presente analisi è il sistema di controlli integrati (procedure e impianti) utilizzato in un deposito costiero petrolchimico “a rischio di incidente rilevante” durante la fase di sbarco dei prodotti dalle navi - cisterna. Lo scopo è quello di valutare il decremento del rischio di overflow del prodotto dal serbatoio sotto carico a seguito dell’installazione di un impianto di rilevamento automatico del livello del prodotto.

2. BREVE DESCRIZIONE DEL SISTEMA AUTOMATICO DI RILEVAMENTO LIVELLO

Il sistema automatico di rilevamento del livello del prodotto è divenuto parte integrante delle procedure di controllo (consolidate) messe in atto nel deposito durante la fase di sbarco dei prodotti (v. Cap. 3).

Il sistema segnala, per mezzo di rivelatori ottici e/o acustici, il livello raggiunto dal prodotto all’interno del serbatoio in fase di riempimento quando raggiunge le tre seguenti quote fondamentali.

2.1. Soglia di attenzione

E’ la soglia a partire dalla quale il controllo del livello avviene in modo continuo da parte degli addetti; detta soglia è collocata a 5.5 metri o a 5.9 metri (a seconda del size del serbatoio) dal fondo del medesimo.

Quando il livello del prodotto raggiunge la soglia di attenzione nell’i-esimo serbatoio in fase di carico fra gli n serbatoi predisposti al ricevimento ($1 \leq i \leq n$), sul quadro sinottico ubicato in sala collettori (sempre presidiata) si accende un indicatore luminoso.

2.2. Soglia di preallarme (Hi)

E’ la soglia alla quale viene aperta la valvola v_{i+1} che adduce il prodotto al serbatoio S_{i+1} successivo all’i-esimo serbatoio in fase di riempimento. Detta soglia è collocata a 6 metri dal fondo dei serbatoi. Quando viene aperta la valvola v_{i+1} nel serbatoio S_i la portata di inlet praticamente si dimezza in quanto circa la metà di essa viene deviata su S_{i+1} . Quando il livello del prodotto raggiunge la soglia di preallarme, sul quadro sinottico ubicato in sala collettori si accende un ulteriore indicatore luminoso.

2.3. Soglia di allarme (HiHi)

E’ la soglia alla quale viene chiusa la valvola v_i che adduce il prodotto al serbatoio S_i . Detta soglia è collocata a 6.5 metri dal fondo dei serbatoi e coincide con il livello di full - top, ovvero con il livello massimo di riempimento dei serbatoi ammesso dal deposito; livello che ne determina la capacità effettiva.

Giova evidenziare che tutti i serbatoi hanno un’altezza pari a 7 metri; su ciascuno di essi viene pertanto a crearsi un “franco” di 0.5 metri che costituisce un “volume disponibile per l’emergenza” compreso tra 6 e 125 m³ a seconda del size del serbatoio.

Quando il livello del prodotto raggiunge la soglia di allarme, sul quadro sinottico ubicato in sala collettori si attiva anche un segnale ottico / acustico.

3. PROCEDURE DI SBARCO DEL PRODOTTO

Alla luce dell’installazione del sistema automatico di rilevamento del livello del prodotto nei serbatoi assumono particolare rilevanza le sottoelencate procedure di sbarco adottate nel deposito.

0.0 Identificazione dei componenti della squadra di sbarco del deposito, formata da 4 addetti: il capo turno (C.T.), il capo squadra (C.S.) e due addetti (Alpha e Beta).

1.0 Accertamento del quantitativo di prodotto (V_A = volume accertato) a bordo della nave da parte del C.T., in contraddittorio con il Comando Nave (Master) ed il Perito della controparte (Cargo Inspector, Surveyor della Compagnia assicuratrice o del Cliente).

1.1 Definizione della rata massima di pompaggio a regime con il Comando Nave:

$P_{max} = 6$ bar (alla banchina);

$Q_{max 6''} = 150 \div 170$ m³/h (per le tubazioni da 6 pollici di diametro);

$Q_{max 8''} = 200 \div 220$ m³/h (per le tubazioni da 8 pollici di diametro).

1.2 Definizione della rata di pompaggio a basso regime con il Comando Nave:

$Q_{br 6''} = 80$ m³/h; $Q_{br 8''} = 100$ m³/h .

1.3 Preparazione ed assetto delle linee (già bonificate) a seconda dell’accosto nave e lancio, mediante

azoto, degli scovoli di prova (pig) dal barrel di testa per il controllo delle medesime prima del transito dei prodotti (v. fig. 1; aperte le valvole $v_{11} - v_{10} - v_8 - v_7 - v_6$; chiuse tutte le altre valvole).

1.4 Recupero dei pig dal barrel di fine linea.

2.0 Il C.T. controlla il livello di prodotto contenuto negli n serbatoi predisposti al ricevimento al fine di calcolare il volume totale disponibile (V_D).

Il volume disponibile nell' i -esimo serbatoio (V_i) è quello compreso tra il pelo libero del prodotto in esso eventualmente contenuto ed il livello di full-top.

2.1 Il controllo del quantitativo di prodotto contenuto negli n serbatoi viene effettuato sia confrontando la documentazione contabile del deposito con quella del Cliente (le giacenze devono collimare), sia misurando il livello del prodotto:

- a) traguardando otticamente il sistema a vasi comunicanti montato esternamente ai serbatoi;
- b) immergendo dal tappo sonda dei serbatoi la rotella metrica per il rilevamento mediante tasteggio a bagnamento.

2.2 La doppia misurazione di cui sopra viene eseguita su tutti gli n serbatoi predisposti al ricevimento, anche su quelli che, dalla documentazione contabile, risultano vuoti e bonificati; il doppio controllo permette, tra l'altro, di verificare la corrispondenza di quanto segnalato dal sistema a) con la misura diretta secondo b).

2.3 Il C.T. si accerta che il prodotto eventualmente presente in alcuni dei serbatoi di ricevimento sia lo stesso di quello in sbarco, confrontando la documentazione contabile deposito/Cliente con quella della nave, nonché con le analisi del prodotto in sbarco, effettuate in tempo reale dal preposto laboratorio chimico.

2.4 Confronto fra il quantitativo di prodotto accertato V_A ed il volume totale disponibile V_D negli n serbatoi, per avere conferma che $V_D > V_A$.

2.5 Il C.T. calcola il livello (h_n) che il prodotto raggiungerà nell' n -esimo serbatoio a fine sbarco, tenuto conto dell'invaso della linea.

2.6 Ugualmente il Comando Nave calcola, se il prodotto non è segregato, il livello (h_{bn} = altezza livello a bordo nave) che il prodotto raggiungerà a fine sbarco.

Quando il livello raggiungerà h_n nell' n -esimo serbatoio in riempimento presso il deposito, contestualmente raggiungerà il livello h_{bn} a bordo nave.

2.7 Quando il livello sarà prossimo a h_n , nel caso in cui il serbatoio avesse size $\geq 400 \text{ m}^3$ (cfr. p.to 13.0), sarà il C.T. a dare alla banchina l'ordine di portare le pompe a basso regime; nel caso di serbatoio avente size $< 400 \text{ m}^3$, si evidenzia che le pompe operano a basso regime dall'inizio alla fine del travaso (cfr. p.to 7.2).

2.8 Quando il livello sarà pari a h_n il C.T. darà l'ordine di stop alle pompe.

2.9 Qualora il livello del prodotto a bordo nave si avvicinasse e raggiungesse la soglia h_{bn} prima dell'intervento del C.T., sarà il Comando Nave che, autonomamente, farà portare le pompe a basso regime e darà lo stop.

2.10 Se la partita di prodotto da sbarcare è invece segregata, cioè stoccata in cisterne stagne di capacità nota (capacità anch'essa verificata con le procedure di cui al p.to 1.0), sarà il Comando Nave a provvedere allo strippaggio della cisterna ed a dare lo stop alle pompe.

2.11 Qualora il livello del prodotto nell' n -esimo serbatoio sotto carico si avvicinasse e raggiungesse h_n prima dell'intervento del Comando Nave, sarà il C.T. che, autonomamente, darà gli ordini di basso regime e di stop alle pompe.

3.0 Gli addetti del Porto Petroli collegano la manichetta della nave alla tubazione di terra, mentre la squadra di sbarco si porta in sala collettori e cura il collegamento del collettore principale alla cassa di sbocco ed agli n serbatoi di ricevimento del prodotto; il C.T. controlla che i collegamenti - che vengono effettuati da Alpha e Beta - avvengano in conformità al piano di sbarco predisposto dal deposito.

3.1 Alpha e Beta scendono nelle sale di manovra di tutti i serbatoi di ricevimento per constatare la chiusura dei passi d'uomo e delle valvole di fondo.

3.2 Effettuazione delle prove di comunicazione tra la squadra di sbarco, la banchina ed il Comando Nave:

- a) via filo (telefono dedicato operante fra il deposito e la banchina);
- b) via radio (mediante ricetrasmittitori VHF - can. 10) fra il deposito, gli operatori del Porto Petroli e quelli della nave (Ufficiale di guardia e tankista);
- c) linea Telecom fra il deposito e l'Ufficio Operativo del Porto Petroli (R.T.O.).

La comunicazione tra il deposito e la nave segue la gerarchia: a - b - c.

3.3 Effettuazione delle prove di funzionamento dei sistemi di allarme ottico ed acustico collegati al rilevatori di livello installati nei serbatoi.

4.0 La squadra di sbarco effettua le prove di funzionamento di tutte le valvole della sala collettori poste sulle tubazioni interessate dal passaggio del prodotto mediante sblocco, apertura totale e richiusura delle stesse senza blocco.

4.1 Alpha chiude v_7 ed apre le valvole v_4 e v_0 ; v_4 permette al prodotto di raggiungere il collettore principale, mentre v_0 dal collettore principale immette nella cassa di sbocco per il controllo qualità del prodotto.

5.0 Il C.T. si porta sulla cassa di sbocco ed Alpha resta in posizione sulla valvola v_0 , il C.S. si porta sulla valvola (v_1) di adduzione al primo serbatoio da riempire (S_1), i tre addetti sono tutti in sala collettori e sono ad una distanza di un paio di metri l'uno dall'altro; sono pertanto reciprocamente in vista ed a portata di voce.

5.1 Il C.T. comunica alla banchina di dare il via al pompaggio nave a basso regime.

6.0 Il C.T. ed il Perito della controparte eseguono un esame a vista del prodotto giunto alla cassa di sbocco.

6.1 Su ordine del C.T., il C.S. apre v_1 ed Alpha chiude v_0 .

7.0 Il C.T. si porta sulla sommità di S_1 (che è alla stessa quota della sala collettori) per verificare l'arrivo del prodotto nel serbatoio attraverso l'apertura del tappo sonda.

7.1 Se S_1 è di capacità non inferiore a 400 m^3 , il C.T. comunica alla banchina di portare le pompe nave a regime.

7.2 Se S_1 è di capacità inferiore a 400 m^3 il C.T. fa mantenere per tutta la durata del riempimento la rata di pompaggio minima; inoltre, secondo le procedure adottate, i serbatoi da 100 e 150 m^3 non vengono mai riempiti singolarmente, ma in contemporanea almeno con un altro serbatoio, pertanto la portata di inlet del prodotto viene altresì ridotta.

8.0 Il C.S. ed Alpha scendono nella sala di manovra di S_1 per verificare la tenuta del passo d'uomo e delle valvole di fondo del serbatoio.

8.1 Il C.T. valuta la rata di pompaggio reale della nave in funzione del tempo trascorso dall'inizio riempimento e del livello raggiunto dal prodotto e stima, cautelativamente, il tempo di riempimento di S_1 .

9.0 Il C.T. e Beta eseguono il controllo periodico del livello del prodotto nel serbatoio secondo frequenze predefinite, il C.T. compila il "brogliaccio di sbarco" con livello rilevato e ora del rilevamento.

10.0 Quando il livello del prodotto raggiunge il limite oltre il quale la frequenza dei controlli dev'essere continua (soglia di attenzione), il C.T. si ferma sulla sommità di S_1 e controlla a vista l'innalzamento del prodotto verificandone il livello, coadiuvato da Beta, mediante l'inserimento di un'asta rigida in legno attraverso l'apertura del tappo sonda posta sulla sommità del serbatoio.

Il C.S. ed Alpha restano in sala collettori rispettivamente in posizione su v_1 e v_2 .

10.1 La presenza del C.T. sulla sommità di S_1 per effettuare con continuità i necessari controlli del livello è garantita dalla procedura di cui al p.to 9.0; inoltre, cautelativamente, sui serbatoi di size $\geq 400 \text{ m}^3$, è altresì installato un sistema di rilevamento del livello, posto ad un'altezza variabile da 5.5 m a 5.9 m dal fondo dei serbatoi, che attiva automaticamente un segnale ottico posizionato in sala collettori.

L'attivazione di detto segnale obbliga il C.T. a recarsi sulla sommità del serbatoio in questione (qualora ciò non si fosse già verificato - p.to 9.0).

Questo sistema di segnalazione non è installato sui serbatoi di size $< 400 \text{ m}^3$ in quanto la presenza continua del C.T. sulla loro sommità è resa obbligatoria a partire dall'inizio del riempimento.

10.2 Quando il livello raggiunge i 6 metri (soglia di preallarme) il C.T. comunica a voce ad Alpha, o incarica Beta di comunicare ad Alpha (nel caso in cui il C.T. si trovasse lontano dalla sala collettori - al massimo 100 metri circa), di aprire v_2 .

10.3 Inoltre, nei serbatoi di size $\geq 400 \text{ m}^3$, quando il livello raggiunge i 6 metri, nella sala collettori si attiva automaticamente un ulteriore segnale ottico di preallarme (Hi) comandato da una sonda installata nel serbatoio a 6 metri dal fondo; questo segnale obbliga Alpha ad aprire v_2 a prescindere dall'aver ricevuto comunicazione in merito da parte del C.T.

10.4 Quando il livello raggiunge i 6.5 metri (soglia di allarme) - si noti che nel frattempo la velocità di innalzamento del prodotto si è praticamente dimezzata essendo v_2 aperta - con le medesime procedure del punto precedente, il C.T. comunica al C.S. di chiudere v_1 .

10.5 Inoltre, nei serbatoi di size $\geq 400 \text{ m}^3$, quando il livello raggiunge i 6.5 metri, nella sala collettori si attiva automaticamente un segnale ottico/acustico di allarme (HiHi) comandato da una sonda installata nel serbatoio a 6.5 metri dal fondo; questo segnale obbliga il C.S. a chiudere v_1 a prescindere dall'aver ricevuto la comunicazione del C.T.

11.0 Inizio del riempimento di S_2 a partire dalle procedure di cui al p.to 7.0.

11.1 Inizio del riempimento di S_n a partire dalle procedure di cui al p.to 7.0 e fino a quelle di cui al p.to 8.1. Successivamente:

12.0 Il C.T. esegue il controllo periodico del livello del prodotto nel serbatoio secondo frequenze predefinite che, se h_n coincide con il full - top, coincidono con quelle di cui al p.to 9.0.

13.0 Quando il livello del prodotto raggiunge l'altezza prevista dalla tab. 2 il C.T. comunica alla banchina di portare le pompe a basso regime (qualora ciò non fosse già accaduto - cfr. p.ti 2.9 e 2.10).

13.1 Quando il livello del prodotto raggiunge h_n il C.T. darà alla banchina l'ordine di stop alle pompe (qualora ciò non fosse già accaduto - cfr. p.ti 2.9 e 2.10).

14.0 Concluso il pompaggio il C.T. ed il Perito della controparte si recano a bordo per accertare lo stato di totale svuotamento delle cisterne al fine di firmare il documento di "dry-tank", nel caso il prodotto fosse stato segregato; se il prodotto, invece, non era segregato (era cioè stoccato in un'unica cisterna avente capacità superiore a V_D) il C.T., il Perito della controparte ed il Comando Nave effettuano la misura del livello del prodotto rimanente (con le stesse procedure di cui al p.to 01.0).

14.1 Concluse le precedenti operazioni il C.T. ritorna in sala collettori ed ordina di chiudere v_4 , aprire v_6 e v_5 e di mantenere aperta v_n .

14.2 Nel frattempo gli operatori del Porto Petroli chiudono v_{11} e staccano la manichetta della nave dalla tubazione di terra; inseriscono il pig nel barrel di testa e, ottenuto il via dal C.T., insufflano azoto in pressione per lo svuotamento dell'invaso delle linee.

Il prodotto contenuto nelle linee, che varia da 10 a 18 m^3 a seconda del diametro della tubazione utilizzata per lo sbarco e del quale il C.T. ha già tenuto conto (cfr. p.to 02.5), confluisce in S_n .

14.3 Quando il pig raggiunge il barrel posto in sala collettori il C.T. dà ordine di chiudere v_5 , aprire v_7 ed estrarre il pig dal barrel.

14.4 Il C.T. fa rimuovere i collegamenti tra il collettore principale e le linee che adducono ai serbatoi $S_1 \div S_n$; queste ultime vengono flangiate cieche.

14.5 Possono considerarsi concluse le operazioni di sbarco.

4. TEMPI DI RIEMPIMENTO DEI SERBATOI

Come già anticipato, i serbatoi di size $\geq 400 m^3$ vengono riempiti con rata di pompaggio compresa tra 150 \div 220 m^3/h (v. Cap. 3., p.to 1.1), detta portata si dimezza allorquando durante la fase di riempimento dell' i -esimo serbatoio (S_i) viene aperta la valvola v_{i+1} di S_{i+1} (v. Cap. 3., p.ti 10.2 - 10.3 - 10.4).

Il calcolo dei tempi in gioco, riassunti in tab. 1, sono stati svolti considerando $Q = 220 m^3/h$.

SIZE [m3]	t0	t1	T2	t3	t2*	t3*
1600	365	6	60	60	30	30
1300	300	5	50	50	25	25
1000	213	19	38	38	19	19
650	141	13	26	26	13	13
400	87	8	16	16	8	8

Tabella 1

Dove:

t_0 = tempo intercorrente, in minuti, dall'inizio riempimento all'inizio del controllo continuo (soglia di attenzione posta ad un livello variabile tra 5.5 \div 5.9 m dal fondo);

t_1 = tempo intercorrente, in minuti, dall'inizio del controllo continuo al segnale di preallarme Hi (posto a 6 m dal fondo);

t_2 = tempo intercorrente, in minuti, dal segnale di Hi al segnale di allarme HiHi (full-top posto a 6.5 m) a Q ridotta a seguito apertura v_{i+1} (110 m^3/h);

t_3 = tempo intercorrente, in minuti, dal segnale di allarme (HiHi) all'overflow (7 m) a Q ridotta a seguito apertura v_{i+1} (110 m^3/h);

t_{2*} = tempo intercorrente, in minuti, dal segnale di Hi al segnale di allarme HiHi (full-top posto a 6.5 m) a Q di regime (220 m^3/h) a seguito mancata apertura di v_{i+1} ;

t_{3*} = tempo intercorrente, in minuti, dal segnale di allarme (HiHi) all'overflow (7 m) a Q di regime (220 m^3/h) a seguito mancata apertura di v_{i+1} .

I serbatoi da 100 e 150 m³ vengono riempiti con rata di pompaggio a basso regime, quindi con portata $Q_{br\ 8''} = 100\text{ m}^3/\text{h}$ (se il prodotto giunge in deposito attraverso oleodotto da 8'' - v. Cap. 3., p.to 1.1) o con portata $Q_{br\ 6''} = 80\text{ m}^3/\text{h}$ (se il prodotto giunge in deposito attraverso oleodotto da 6'' - v. Cap. 3., p.to 1.1); inoltre atteso che ciascuno di detti serbatoi viene riempito sempre in contemporanea almeno con un altro (v. Cap. 3., p.to 7.2), in realtà la portata effettiva sarà pari a circa $Q_{br\ 8''} / 2 = 50\text{ m}^3/\text{h}$ o $Q_{br\ 6''} / 2 = 40\text{ m}^3/\text{h}$.

Come per i serbatoi di size maggiore, i calcoli dei tempi in gioco, riassunti nella seguente tab. 2, sono stati svolti supponendo che il prodotto giunga in deposito attraverso l'oleodotto da 8''.

SIZE [m3]	t0+t1	t2	t3
150	158	13.2	13.2
100	104	8.7	8.7

Tabella 2

Dove:

$t_0 + t_1$ = tempo intercorrente, in minuti, dall'inizio riempimento al raggiungimento del livello di preallarme posto a 6 m;

t_2 = tempo intercorrente, in minuti, dal livello di 6 m al livello di 6.5 m (full-top);

t_3 = tempo intercorrente, in minuti, dal full-top all'overflow (7 m).

In tab. 3 sono invece riassunti i tempi intercorrenti, per ogni size di serbatoio, dall'inizio del controllo continuo all'eventuale overflow sia nel caso in cui la portata viene correttamente ridotta, sia nel caso in cui ciò non avvenisse a seguito della mancata apertura della valvola v_{i+1} .

SIZE [m3]	T4	t4*
1600	126	66
1300	105	55
1000	95	57
650	65	39
400	40	26
150	184.4	184.4
100	121.4	121.4

Tabella 3

Dove:

t_4 = tempo intercorrente, in minuti, dal momento in cui il C.T. inizia le operazioni di controllo continuo del livello al momento dell'eventuale overflow.

Per i serbatoi di size $\geq 400\text{ m}^3$: $t_4 = t_1 + t_2 + t_3$.

Per i serbatoi di size $< 400\text{ m}^3$: $t_4 = t_0 + t_1 + t_2 + t_3$.

t_{4*} = tempo intercorrente, in minuti, dal momento in cui il C.T. inizia le operazioni di controllo continuo del livello al momento dell'eventuale overflow nel caso che la portata Q non venisse ridotta a seguito della mancata apertura della valvola v_{i+1} .

Per i serbatoi di size $\geq 400\text{ m}^3$: $t_{4*} = t_1 + t_2^* + t_3^*$.

Per i serbatoi di size $< 400\text{ m}^3$: $t_{4*} = t_4 = t_0 + t_1 + t_2 + t_3$ in quanto il riempimento di detti serbatoi avviene a portata di basso regime, ulteriormente ridotta a seguito del concomitante riempimento di un altro serbatoio (non si inizia a riempire S_i se non è aperta anche v_{i+1} per il contestuale riempimento di S_{i+1}).

5. ANALISI DEL RISCHIO DI OVERFLOW

Scopo della presente analisi di rischio è quello di valutare la probabilità di accadimento del Top Event (overflow) a seguito dell'installazione di un sistema di rilevamento automatico del livello del prodotto nei serbatoi del deposito costiero in studio, in un contesto in cui le procedure di rilevamento manuale precedentemente utilizzate avevano ormai raggiunto un'affidabilità tale da divenire parte integrante della Certificazione di Qualità ottenuta dal deposito secondo le norme UNI EN - ISO 9002.

5.1 Metodologia di analisi

La metodologia di analisi seguita ha dovuto quindi confrontarsi con un sistema integrato di controllo dei livelli in cui la parte automatizzata non doveva pregiudicare l'affidabilità raggiunta dalla parte procedurale che però, proprio a causa del nuovo automatismo, doveva comunque essere modificata.

Con il vincolo di tali condizioni al contorno il sistema integrato di controllo (automatismo + procedure) ed il sistema di trasferimento del prodotto (da banchina portuale a deposito costiero) sono stati suddivisi in sottosistemi ai quali, una volta individuati i nodi di frontiera ed interni, è stata sistematicamente applicata l'Operability Analysis (O.A.), il cui modello logico - induttivo permette l'individuazione di tutti gli scenari incidentali che possono derivare dalle cause iniziatrici considerate.

Opportuno evidenziare che nel caso in studio l'O.A. è stata effettuata partendo da uno stato di fatto già completamente delineato e consolidato, sottoponendo il lay-out dell'impianto (v. fig. 1) e le procedure di sbarco (v. Cap. 3) ad un esame sistematico finalizzato ad individuare potenziali situazioni di rischio connesse al riempimento dei serbatoi.

Successivamente sia il sistema integrato di controllo dei livelli che quello di trasferimento del prodotto sono stati sottoposti alla Fault Tree Analysis (F.T.A.), in quanto ritenuta il modello logico - deduttivo più efficace per consentire la stima della probabilità attesa di accadimento del T.E. postulato.

Nella F.T.A. condotta sulla parte procedurale del sistema integrato l'errore umano - che è l'elemento più significativo - è stato quantificato a partire da alcune frequenze statistiche, successivamente verificate utilizzando il modello matematico sviluppato da Poisson nell'ambito della teoria delle probabilità.

Gli eventi elementari che compongono il F.T. sono stati poi combinati attraverso porte logiche (v. fig. 2) e le relative catene sequenziali risolte tramite l'algebra di Boole, proseguendo con la determinazione dei vettori di cut (minimal cut set) e concludendosi con il calcolo della probabilità attesa del T.E.; questo dopo che i ratei di guasto relativi ai singoli eventi elementari sono stati trasformati in probabilità di guasto omogenee.

5.2 Ratei di guasto, inaffidabilità e indisponibilità

La stima delle probabilità di accadimento degli eventi elementari che compongono il F.T. è funzione dei ratei di guasto relativi agli eventi stessi, ratei che sono stati ricavati, oltre che dall'archivio storico del deposito, da bibliografia specialistica e da banche dati.

In determinati casi i ratei di guasto sono stati opportunamente modificati in base al giudizio ingegneristico, in considerazione delle condizioni di funzionamento, della manutenzione programmata, delle prove periodiche di funzionamento dell'impianto e dei singoli componenti, ovvero, nel caso di eventi riconducibili all'errore umano, in considerazione delle procedure seguite dal personale e della loro formazione.

Premesso che l'affidabilità di un componente è la probabilità che il componente, sottoposto a sollecitazioni ben definite, assolva alla sua funzione per il periodo di tempo previsto, detto anche tempo di missione, la formula generale che lega l'affidabilità, che è una probabilità (adimensionale), al rateo di guasto λ , che ha le dimensioni del reciproco di un tempo, è la seguente:

$$R(t) = e^{-\int \lambda dt} \quad (1)$$

Qualora λ sia indipendente dal tempo, vale a dire i guasti si manifestano in maniera assolutamente aleatoria, e questo è il caso dei guasti accidentali in cui $\lambda(t) = \text{costante}$, la (1) integrata diventa:

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (2)$$

Se si considera quindi che il componente vada fuori servizio soltanto per cause accidentali, si può osservare che la sua affidabilità, per una missione che dura un tempo t , è indipendente dal momento in cui il guasto si verifica ed è solo funzione dell'intervallo di tempo t , e del rateo di guasto λ .

Nel caso di componenti di cui si debba calcolare la disponibilità a rispondere ad una chiamata d'intervento, invece che le ore di servizio occorre introdurre il numero dei cicli di funzionamento $c = c(t)$.

In relazione a quanto sopra, le formule che regolano il calcolo dell'inaffidabilità, o probabilità di guasto $Q(t)$, e dell'indisponibilità $Q'(t)$ dei vari componenti sono le seguenti:

$$Q(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (3)$$

$$Q'(t) = 1 - e^{-I'c} \quad (4)$$

$$Q'(t) = [I'/(I' + m)] [1 - e^{-(I' + m)t}] \quad (5)$$

Con le semplificazioni previste nei casi in cui il rateo di guasto λ è sufficientemente piccolo, se rapportato al tempo di missione t , se cioè si ha che $\lambda t \ll 1$, l'inaffidabilità $Q(t)$ è approssimata dall'espressione:

$$Q(t) = I't \quad (6)$$

Mentre se il tempo di evidenziazione del guasto è trascurabile rispetto al tempo di riparazione $\tau = 1/\mu$ e se il tempo di riparazione è piccolo rispetto all'intervallo fra guasti, il valore asintotico dell'indisponibilità $Q'(t)$ può essere approssimato, nei casi in cui il guasto si autoevidenzia, con:

$$Q'(t) = I't \quad (7)$$

In ultimo, se il tempo di riparazione del guasto è trascurabile rispetto all'intervallo θ fra i test intesi ad evidenziare il guasto stesso, la $Q'(t)$, nei casi in cui il guasto non si autoevidenzia è ben approssimata da:

$$Q'(t) = I' q/2 \quad (8)$$

6. GUIDA ALLA LETTURA DEL FAULT TREE RELATIVO ALL'OVERFLOW DI S_i

Il fault tree di fig. 2 è relativo all' i -esimo tra gli n serbatoi predisposti al ricevimento del prodotto. Per i -esimo serbatoio (indicato nel presente studio con S_i) si intende uno qualsiasi degli n serbatoi predisposti al ricevimento del prodotto ad esclusione dell' n -esimo (S_n), che è l'ultimo serbatoio ad essere riempito.

Dall'analisi del F.T. si evince che l'overflow durante la fase di riempimento dell' i -esimo serbatoio è dovuto essenzialmente all'accadimento di almeno uno di questi due eventi: il mancato intervento dell'operatore (Capo Squadra) che non chiude la valvola v_i (G2), o, nonostante l'intervento dell'operatore, da un guasto al sistema di intercettazione del prodotto (G6). La logica relativa al primo evento sottende il ramo sinistro del F.T., mentre la logica relativa al secondo evento sottende il ramo destro.

Scendendo lungo il ramo sinistro del F.T. si constata che il mancato intervento del Capo Squadra può derivare solo dal concomitante accadimento di due eventi: il Capo Turno non ordina la chiusura di v_i (G3) e il segnale di allarme ottico acustico di HiHi non funziona (5).

Scendendo ulteriormente lungo il ramo sinistro si può constatare che il mancato ordine del Capo Turno di chiudere la valvola v_i è un evento che, a sua volta, si verifica all'accadimento di uno qualsiasi dei due seguenti eventi: il primo evento è che il C.T. e Beta non si siano portati sulla sommità di S_i per eseguire il controllo del livello (G4); il secondo è che il C.T. (coadiuvato da Beta) - pur trovandosi in postazione su S_i - sbagli tutti i controlli di livello del prodotto (4).

In ultimo il fatto che né il C.T. né Beta siano presenti sulla sommità di S_i discende dall'accadimento concomitante di ben tre eventi: il primo è che il segnale ottico di attenzione si sia guastato (1); il secondo è che anche il segnale di preallarme (Hi) si sia guastato (2); il terzo - in AND speciale con i due eventi precedenti (INHIBIT) - è che sia il C.T. che Beta, ma di riflesso anche gli altri componenti della squadra di sbarco, omettano di seguire le procedure (3).

Così si spiega la condizione logica di INH; infatti, a prescindere dall'accadimento di (1) e (2), seguendo le sole procedure il C.T. e Beta sono obbligati a portarsi autonomamente su S_i (cfr. Cap. 3., p.ti 9.0 - 10.0).

Per quanto riguarda le probabilità di accadimento dei singoli eventi elementari che costituiscono il ramo sinistro del F.T., si evidenzia che quelle relative agli eventi (1) - (2) - (5), i cui ordini di grandezza sono conformi all'esperienza di settore, sono state calcolate seguendo la metodologia classica, ovvero partendo dai ratei di guasto ricavati da [2] e [11], tenuto conto che, in media, presso il deposito di cui trattasi si effettuano 120 sbarchi/anno e che, ad ogni sbarco, vengono solitamente riempiti 3 serbatoi, ciascuno dei quali in un tempo massimo di 8 ore.

Vista la diversa metodologia seguita, si ritiene invece più opportuno dettagliare il calcolo delle probabilità di accadimento degli eventi (3) e (4).

In relazione all'evento (3) occorre premettere che gli errori umani vengono classificati in due grandi categorie o tipi (cfr. [7] e [8]) e cioè:

- errori di omissione (“Error of Omission”), a causa dei quali un passo di procedura o un insieme di passi correlati vengono omessi durante l’esecuzione;
- errori di selezione (“Error of Commission”), che riguardano mancanze di conoscenza, interpretazioni errate di segnali e/o misure, nozioni distorte, ecc.

Con riferimento alle due precedenti definizioni, in [1] si legge che la probabilità di accadimento dell’errore di omissione di un’azione inserita in una procedura (“Error of omission of action embedded in a procedure”) è stimata pari a $5.0 \text{ E } -03$.

Nel caso in esame, alla luce di quanto sopra e tenuto conto che:

- a) l’assenza di C.T. e Beta dalla sommità di S_j non si concretizza a seguito dell’omissione di una sola azione inserita nelle procedure di sbarco, bensì a seguito dell’omissione di tutta la parte procedurale inerente il controllo dei livelli nei serbatoi;
- b) anche il C.S. e Alpha non devono seguire le procedure, diversamente si accorgerebbero del fatto che la sommità di S_j non è presidiata né dal C.T. né da Beta;

si è ritenuto cautelativo far discendere la probabilità di accadimento di (3) dal prodotto logico AND della probabilità di errore di omissione dei soli C.T. e Beta, in quanto, per non essere presenti sulla sommità di S_j , entrambi, ed autonomamente, dovrebbero disattendere le procedure di sbarco.

Concludendo:

$$P(3) = (5.0 \text{ E } -03)^2 = 2.5 \text{ E } -05.$$

Diverso è il procedimento «logico - matematico» che ha portato alla stima della probabilità di accadimento di (4) che, come caso particolare di “Human error of Commission”, è stato oggetto di approfonditi studi da parte degli esperti del settore.

Infatti in [1] si legge che l’errore di lettura di uno strumento di misura (“Incorrect reading of gauge”) ha una probabilità di accadimento pari a $6.0 \text{ E } -03$; mentre in [9] si legge che la lettura sbagliata di uno strumento di misura ha una frequenza indicativa pari a 5000 errori per milione di letture effettuate, che equivale ad una probabilità di errore pari a $5.0 \text{ E } -03$ per ogni lettura, valore di fatto coincidente con quello proposto da [1].

Prima dell’elaborazione «logico - matematica» del dato fornito da [1] (in quanto il più cautelativo), si ritiene utile allo scopo fornire alcuni chiarimenti in merito alla strumentazione ed alla metodologia adottata dagli operatori (C.T. e Beta) per il controllo del livello del prodotto nei serbatoi.

Innanzitutto occorre evidenziare che lo strumento utilizzato per controllare il livello del prodotto nel serbatoio in realtà non è uno strumento di misura propriamente detto, bensì uno strumento di “riscontro” del livello, in quanto è un’asta rigida, lunga circa 1.5 metri, sulla quale è segnata una sola “tacca”.

Quando la “testa” dell’asta poggia sull’apertura del tappo sonda del serbatoio sottoposto a controllo, la “tacca” riportata sull’asta di riscontro coincide con il livello di full - top posto a 6.5 metri dal fondo del medesimo.

E’ pertanto evidente che gli operatori non devono effettuare una vera e propria misura di livello su un’asta metrica graduata, ma, più semplicemente, verificare solo se l’altezza del prodotto ha raggiunto o meno la “tacca”, riducendo in tal modo, e notevolmente, la possibilità di errore.

Da quanto sopra si evince chiaramente che un eventuale errore di lettura non pregiudica le letture successive trattandosi (le letture) di singoli eventi stocasticamente indipendenti. Infatti la lettura A, se errata, non inficia la lettura B che può essere a sua volta corretta o errata, e così via al crescere del numero di letture; ne consegue quindi che la probabilità di errore per ogni singola lettura A - B - C - ... - n, è costante (contrariamente alle «catene di Markov» dove lo stato χ_i influenza χ_{i+1}).

Si può quindi concludere che per l’operatore è condizione necessaria e sufficiente effettuare, in tempo utile, una sola lettura corretta fra quelle comprese nell’intervallo chiuso [A - B - C - ... - n] al fine di ordinare la chiusura di v_i .

Con riferimento al caso in esame, dal Cap. 4 emerge che il tempo minimo che impiega il prodotto per portarsi dal livello di full - top a quello di overflow (t_{3*}) è di 8 minuti (alla Q di regime ed a seguito della mancata apertura di v_{i+1}).

Tenuto conto che il tempo necessario ad effettuare una lettura di livello è inferiore a 20 secondi, si ricava che in otto minuti gli operatori possono effettuare oltre 24 letture¹.

¹ In tal caso si è cautelativamente ipotizzato che il C.T. e Beta abbiano sbagliato in precedenza anche tutte le letture di livello intercorrenti tra i 6 metri ed i 6.5 metri; per effettuare le quali, sempre nel caso ipotizzato, i suddetti operatori dispongono ugualmente di un tempo pari a 8 minuti.

Inoltre, constatato che il tempo necessario al C.S. per chiudere manualmente v_i è inferiore a 30 secondi discende che il C.T. e Beta hanno a disposizione almeno 22 letture a partire dal livello di full - top di S_i prima che si verifichi l'overflow.

Supponendo, in via estremamente cautelativa, che gli operatori siano in grado di effettuare solo 5 letture invece delle 22 possibili, per non ordinare la chiusura di v_i , a seguito di quanto sopra esposto, il C.T. e Beta dovrebbero sbagliare tutte e cinque le letture effettuate.

La probabilità di errore totale della sequenza di letture costituita dall'intervallo chiuso $u = [A - B - C - D - E]$, riferita ad uno solo dei due operatori, vale quindi:

$$P(u) = P(A) \cdot P(B) \cdot P(C) \cdot P(D) \cdot P(E) = (6.0 \text{ E } -03)^5 = 7.7 \text{ E } -12 = P(4)$$

che, dal punto di vista della logica booleana, corrisponde ad un AND con cinque ingressi indipendenti ed equiprobabili (uno per ciascuna lettura errata).

Una verifica sull'ordine di grandezza del risultato ottenuto è stata possibile utilizzando il modello matematico sviluppato da Poisson nell'ambito della teoria della probabilità [2], nella cui formulazione finale, la funzione densità di distribuzione di probabilità è:

$$f(x|\lambda) = e^{-\lambda} (\lambda^x / x!) \quad (9)$$

ed indica, con riferimento al caso in esame, la probabilità di avere esattamente x errori di lettura nell'intervallo unitario, quando λ è l'intensità di manifestazione dell'insuccesso nell'intervallo stesso.

Per applicare la formula relativa al modello discreto di Poisson è necessario utilizzare quale dato di partenza quello fornito da [9], e cioè il verificarsi, statisticamente, di 5000 errori di lettura di uno strumento ogni milione di letture.

Sulla base di ciò è possibile asserire che 5 errori di lettura sono distribuiti a caso su mille letture, ovvero che i 5 errori sono distribuiti a caso su 200 intervalli chiusi composti da 5 letture ciascuno - come il precedente $u = [A - B - C - D - E]$ - che formano lo spazio vettoriale $w = \{u_1, u_2, u_3, \dots, u_{200}\}$.

Applicando la formula di Poisson è possibile calcolare la probabilità che tutti gli errori di lettura siano compresi all'interno di uno qualsiasi dei vettori dello spazio w , in altre parole la formula fornisce la probabilità che i 5 errori siano tutti compresi in una qualsiasi delle 200 sequenze composte da 5 letture ciascuna; in tal caso $\lambda = 5 / 200 = 2.5 \text{ E } -02$, da cui la probabilità $f(x|\lambda) = 7.9 \text{ E } -11$.

In ultimo, la probabilità che la sequenza contenente i 5 errori sia proprio quella messa in atto dagli operatori vale: $f(x|\lambda) / 200 = 0.4 \text{ E } -12$, che è dello stesso ordine di grandezza ($\exp -12$) della $P(4)$ precedentemente calcolata; confermandone in tal modo, anche dal punto di vista quantitativo, la validità.

Lo sviluppo del ramo destro del F.T. evidenzia invece che il prodotto potrebbe non venire intercettato (oltre che per il mancato intervento del Capo Squadra illustrato in precedenza) a seguito di un guasto al sistema di intercettazione (G6).

Per guasto al sistema di intercettazione si intende il concomitante mancato funzionamento degli organi di intercettazione del prodotto ubicati nel deposito (G7) e la mancata chiusura degli organi di intercettazione ubicati sia in banchina che a bordo nave (G8).

L'evento (G7) può discendere solamente dal guasto contemporaneo di tutte le valvole di intercettazione installate in campo: v_1 (6), v_4 (7) e v_8 (8); mentre l'evento (G8) può concretizzarsi sia che si verifichi il mancato funzionamento di tutti gli organi di intercettazione posti fuori campo (G9) sia che si verifichi il mancato intervento degli operatori esterni su detti organi di intercettazione per mancanza di ordini in merito (G10).

Scendendo ulteriormente lungo il ramo destro del F.T. si nota che l'evento (G9) si verifica solo se, oltre all'impossibilità di fermare la pompa della nave cisterna (10), contestualmente si guastano le valvole v_{10} (9) e v_{11} (11).

L'evento (G10), infine, può verificarsi solo se si guastano tutti i sistemi utilizzati dal deposito per dialogare con gli operatori fuori campo, e cioè:

- linea telefonica dedicata installata direttamente tra il deposito e la banchina del pontile sbarco prodotti (13);
- apparecchiatura ricetrasmittente VHF utilizzata in ambito portuale sul can. 10 dagli operatori di banchina, dal Comando Nave, dall'Autorità Marittima, ecc. (12);
- linea telefonica urbana Telecom (14).

Per quanto riguarda le probabilità di accadimento dei singoli eventi elementari che costituiscono il ramo destro del F.T. si rimanda alla letteratura di settore, in particolare, per gli eventi (6) - (7) - (8) - (9) - (11), a Cremer & Warner [24] che per un modo di guasto quale il blocco di una valvola manuale propongono

$\lambda = 0.1$ / anno, rateo che è stato applicato a tutte le valvole di cui sopra, con i seguenti tempi di missione: per v_1 $C t = 960$ ore, per $v_4 - v_8 - v_{10} - v_{11}$ $C t = 2880$ ore (tempi ricavabili dall'assunzione fatta in precedenza in ordine al numero di sbarchi all'anno, al numero di serbatoi riempiti ad ogni sbarco ed alla durata massima del riempimento).

In relazione a ciò sono state ricavate le seguenti probabilità di guasto:

$$P(6) = 1.0 \text{ E } -02$$

$$P(7) = P(8) = P(9) = P(11) = 3.2 \text{ E } -02$$

Il rateo relativo al modo di guasto "failure to stop" della pompa nave proposto da [1] e [10] è $\lambda' = 1.0 \text{ E } -04$ / rich., da cui è stata calcolata $P(10) = 9.9 \text{ E } -05$.

Un cenno più approfondito meritano le probabilità di accadimento degli eventi elementari facenti capo a (G10), per il cui calcolo si è fatto riferimento ai ratei di guasto proposti dalla bibliografia [10], [12] e [13].

In particolare per l'evento (12) si è fatto riferimento a [10], dove il rateo di guasto di un sistema di comunicazione (trasmettitore - amplificatore - ecc.) è stato stimato pari a 1 ora ogni milione di ore di funzionamento, da cui $\lambda = 1.0 \text{ E } -06$ per ogni ora di funzionamento, che, a seguito di un tempo di missione pari a 2880 ore, fornisce una probabilità di guasto $P(12) = 2.8 \text{ E } -03$.

Mentre per gli eventi (13) e (14) si è fatto riferimento a [12] e [13] che, per "Impulse lines blocked" forniscono un rateo di guasto $\lambda = 3.0 \text{ E } -02$ / anno che, per il medesimo tempo di missione fornisce $P(13) = P(14) = 9.7 \text{ E } -03$.

E' indubbio che le probabilità di guasto come sopra calcolate sono oltremodo cautelative, si pensi ad esempio alla probabilità di guasto del sistema portuale VHF decisamente sovrastimata in relazione all'utilizzo, riscontrabile giornalmente, che ne viene fatto dai vari utenti in ambito portuale; così come è sovrastimata la probabilità di guasto delle linee telefoniche utilizzate, sia perché la linea dedicata ha senz'altro una maggiore affidabilità di quella Telecom, sia perché la probabilità di perdita del traffico telefonico nelle linee urbane è fissata da Telecom, già a livello progettuale, al di sotto di $1.0 \text{ E } -03$.

6.1. Rappresentazione logica del fault tree di Si

La funzione di struttura, o rappresentazione logica dell'albero dei guasti riportato nella fig. 2, ed i dati di affidabilità ed indisponibilità relativi agli eventi elementari in esso contenuti - dai quali si evince che la probabilità di accadimento del T.E. è pari a $5.6 \text{ E } -09$ [occ. / anno] - sono riportati nelle seguenti tabelle 4 e 5.

G1	OR	G2	G6	
G2	AND	G3	5	
G3	OR	G4	4	
G4	INH	3	G5	
G5	AND	1	2	
G6	AND	G7	G8	
G7	AND	6	7	8
G8	OR	G9	G10	
G9	AND	9	10	11
G10	AND	12	13	14

Tabella 4. Rappresentazione logica del F.T. di fig. 2

G1	5.6 E -09	OR	5.6 E -09	3.6 E -12	
G2	5.6 E -09	AND	3.5 E -07	1.6 E -02	
G3	3.5 E -07	OR	3.5 E -07	7.7 E -12	
G4	3.5 E -07	INH	2.5 E -05	1.4 E -02	
G5	1.4 E -02	AND	1.2 E -01	1.2 E -01	
G6	3.6 E -12	AND	1.0 E -05	3.6 E -07	
G7	1.0 E -05	AND	1.0 E -02	3.2 E -02	3.2 E -02
G8	3.6 E -07	OR	1.0 E -07	2.6 E -07	
G9	1.0 E -07	AND	3.2 E -02	9.9 E -05	3.2 E -02
G10	2.6 E -07	AND	2.8 E -03	9.7 E -03	9.7 E -03

Tabella 5. Frequenze delle singole foglie del F.T. di fig 2

6.2. Minimal cut set di Si

Nella seguente tab. 6 sono riportati i minimal cut set (cammini minimi di taglio) I - II - III - IV del F.T. relativo al riempimento dell'i-esimo serbatoio.

I m.c.s. sono le combinazioni minime di eventi elementari, tra loro mutuamente escludentisi, che portano singolarmente al T.E.; nella tabella è altresì riportata la combinazione delle probabilità degli eventi elementari che li costituiscono.

L'algoritmo utilizzato per determinare gli insiemi "cut minimali" del citato F.T. è quello di tipo matriciale proposto da [5], in cui le colonne della matrice composta dagli eventi di base opportunamente disposti, corrispondono ai vettori di cut.

n m.c.s.	VETTORE DI CUT (eventi di base)	PROBABILITA'
I	3 - 1 - 2 - 5	5.6 E -09
II	6 - 7 - 8 - 12 - 13 - 14	2.6 E -12
III	6 - 7 - 8 - 9 - 10 - 11	1.0 E -12
IV	4 - 5	1.2 E -13

Tabella 6. Minimal cut set del F.T. di fig 2

7. CONCLUSIONI

Dall'analisi di rischio svolta, ancorché in prima approssimazione e con tutte le semplificazioni del caso, si evince che a seguito dell'introduzione del sistema automatico di controllo del livello del prodotto nei serbatoi la probabilità di accadimento dell'overflow è stata ridotta da 2.5 E -05 a 5.6 E -09 [occ. / anno].

Infatti in assenza di detto impianto di rilevamento automatico il ramo sinistro del fault tree di fig. 2 perderebbe le foglie n° 1 - 2 - 5 e, quindi, il minimal cut set ad esso relativo avrebbe la probabilità di accadimento di cui alla sola foglia n° 3, calcolata pari a 2.5 E -05 [occ. / anno].

Alla luce di quanto sopra si ritiene che l'installazione di un sistema automatico di controllo dei livelli, benché non asservito a particolari impianti di cut - off della portata, se introdotto nell'ambito di opportune e consolidate procedure di tipo manuale possa rivelarsi comunque estremamente utile allo scopo, in quanto riduce sensibilmente la probabilità di accadimento dell'overflow che, in questo caso e secondo la classificazione prevista da [25], risulta definibile come "evento estremamente improbabile o molto raro".

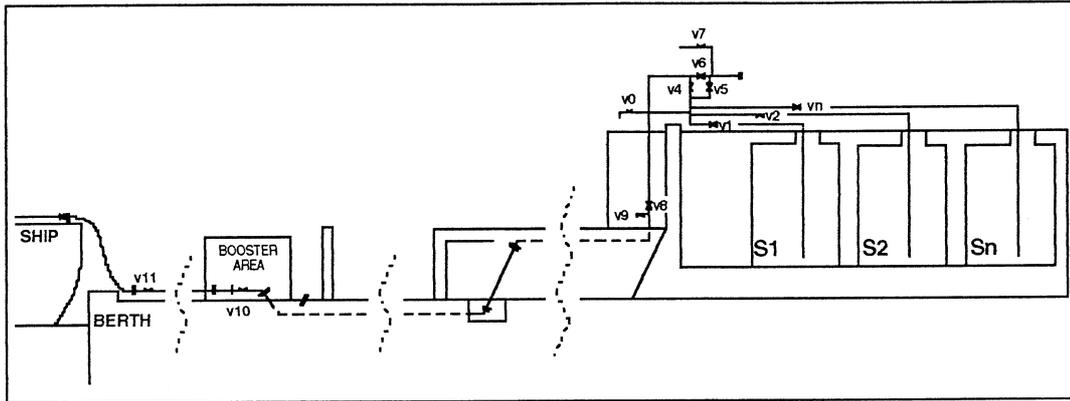


Figura 1. Lay - out schematico impianto deposito

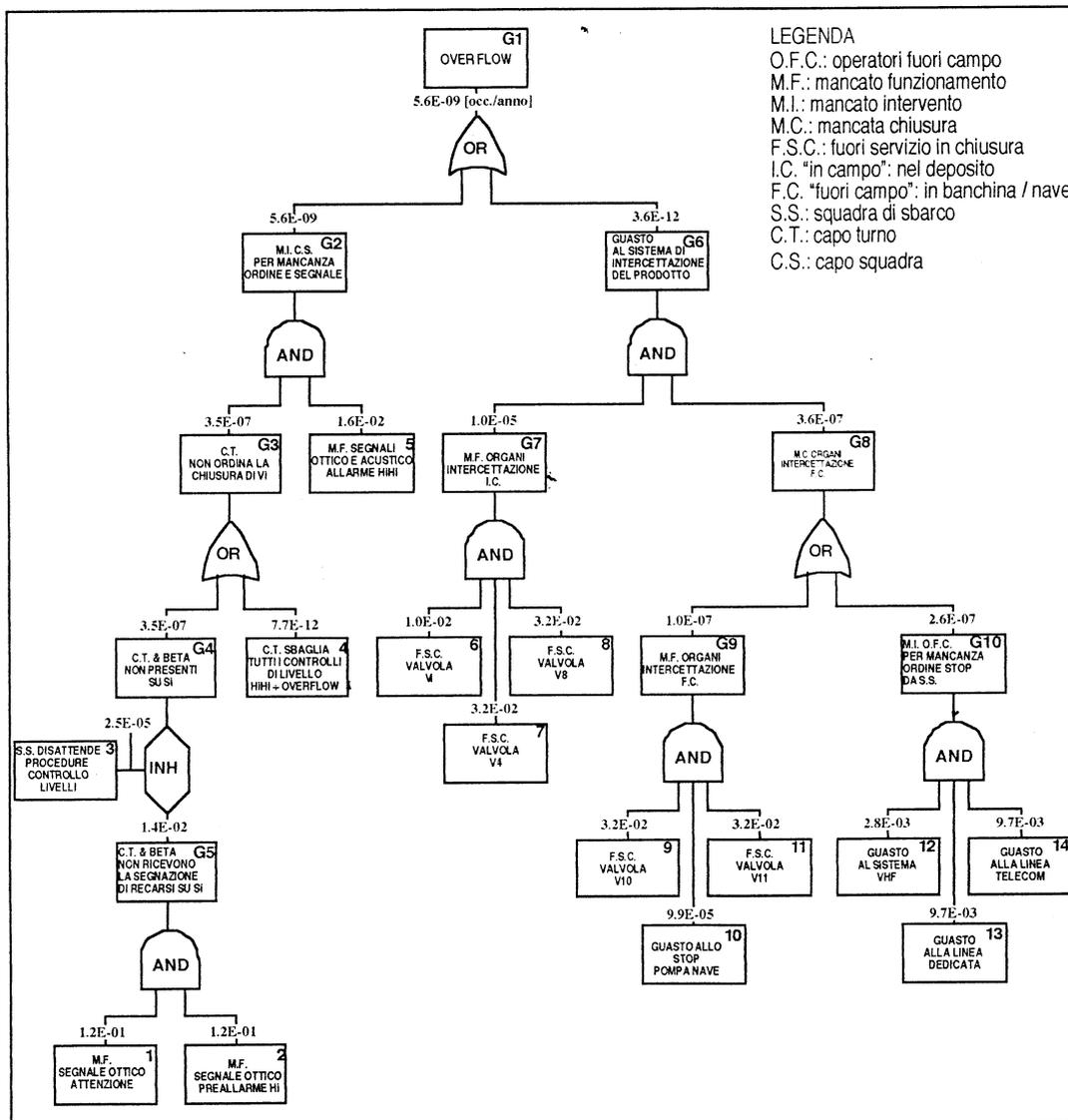


Figura 2. Fault tree overflow S₁ con probabilità per i vari rami

BIBLIOGRAFIA

- [1] A Report to the Rijnmond Public Authority: "Risk Analysis of six potentially hazardous industrial objects in the Rijnmond area, a pilot study".
- [2] S. Ragusa, "Introduzione all'Analisi del rischio nell'industria", Safety Improvement, 1986.
- [3] I. Ciarambino, R. Galvagni, "Albero dei guasti - Albero degli eventi", Snamprogetti per "Safety Managers Training Course", Roma, 1989.
- [4] I. Ciarambino, "Analisi del rischio - Analisi delle decisioni", Syreco per "Safety Managers Training Course", Roma, 1989.
- [5] R. Scozzafava, "Elementi di teoria dell'affidabilità ed applicazioni", Università La Sapienza di Roma per "Safety Managers Training Course", Roma, 1989.
- [6] S. Messina, N. Piccinini, G. Zappellini, "Valutazione probabilistica di rischio", 3ASI - Roma, 1987.
- [7] P.C. Cacciabue, "Valutazione dei fattori umani e dei problemi di interazione uomo macchina per la sicurezza di impianti complessi", Commissione delle Comunità Europee, C.C.R. di Ispra, 1989.
- [8] U. Bersini, P.C. Cacciabue, G. Mancini, "Cognitive modelling: a basic complement of human reliability analysis", Commissione delle Comunità Europee, Centro Comune di Ricerca di Ispra, 1989.
- [9] Powers G.J., Tompkins F.C., "Fault tree synthesis for chemical processes", AIChE Journal, Vol. 20 n. 2, 1974.
- [10] Rasmussen J., "Reactor safety study. An assessment of accident risk in U.S. commercial nuclear power plants", WASH 1400 (NUREG 75/014) PB-248204 U.S. Department of Commerce, 1975.
- [11] IEEE, "Guide to the collection and presentation of electrical, electronic, and sensing component reliability data for nuclear power generating stations", The Institute of electrical and electronics engineers, 1977.
- [12] V. Skala, "Improving Instruments Service Factors", Instrumentation Technology, 1974.
- [13] H.G. Lawley, T.A. Kletz, "Chemical Engineering", 1975.
- [14] US Atomic Energy Commission: "Reactor Safety Study - an Assessment of Accident Risks in the U.S. Commercial Nuclear Power Plants"; WASH - 1400, October 1975, Appendix III "Failure data" (and references therein).
- [15] STATOIL: "Safety Manual. Safety requirements and criteria for technical installations. Conceptual phase", 1981.
- [16] Snamprogetti s.p.a. - Safety and Reliability Department: "Risk analysis of top sides of off shore oil production platform".
- [17] E.J. Henley, H. Kumamoto, "Reliability Engineering and Risk Assessment", Prentice Hall, 1981.
- [18] L. Lusardi, A. Robertson, "Wellheads and Separators Area Risk Analysis", Mila Field Development, Snamprogetti, 1984.
- [19] C. Zennaro, G. Masarotto, R. Spadon, "Analisi di affidabilità per reti critiche dello stabilimento EniChem di Porto Marghera", Università degli Studi di Padova, 1993.
- [20] G. Sacco, L. Lusardi, C. Fiorentini, B. Danieli, "La protezione antincendio negli impianti a rischio di incidente rilevante", VIII Convegno 3ASI, 1990.
- [21] R. Barlow, J. Fussel, N. Singpurwalla, "Reliability and fault tree analysis", Philadelphia, SIAM, 1975.
- [22] E. E. Lewis, "Introduction to Reliability Engineering", New York, John Wiley & Sons, 1987.
- [23] R. Barlow, F. Proshan, "Statistical Theory of Reliability and Life Testing Probabilistic Models", Silver Spring, M.D., 1981.
- [24] Banche dati: Snam Progetti, ENI - Harris, Cremer & Warner, Safety Improvement.
- [25] "General Guidance on Emergency Planning within the CIMAH regulations for chlorine installations", 1968 CIA.