

USO DI FORMULAZIONI DELLA METODOLOGIA CREAM PER LA TRATTAZIONE DELL'ERRORE UMANO NELLA VALUTAZIONE AD ALBERI DI GUASTO DELLA PROBABILITA' DI ESPOSIZIONE DI UN OPERATORE IN UN IMPIANTO DI IRRAGGIAMENTO GAMMA

F. Castiglia, M. Giardina, F. P. Caravello

Dipartimento di Ingegneria Nucleare - Università degli Studi di Palermo,
Viale delle Scienze - 90128 Palermo, Italia

SOMMARIO

Le applicazioni industriali degli impianti di irraggiamento con radiazioni ad alta intensità risultano, ad oggi, numerose. Alcuni esempi si trovano nella sterilizzazione di materiale medico biologico, la decontaminazione di matrici ambientali, nel campo diagnostico e terapeutico della medicina nucleare. Siccome tali impianti possono costituire potenziali fonti di rischio per la salute degli operatori, molti organi nazionali ed internazionali hanno rivolto particolare attenzione alle problematiche di sicurezza al fine di garantire standard di protezione sempre più elevati. A questo proposito, l'International Commission on Radiological Protection, attraverso recenti studi e la pubblicazione di vari rapporti, ha messo in evidenza che l'errore umano è causa prevalente di esposizione potenziale.

Nell'ambito del presente lavoro, utilizzando le tecniche ad alberi di guasto, si sono indagate quelle situazioni incidentali che possono causare l'esposizione potenziale di operatori che, per la loro occupazione, si trovino all'interno di strutture che fanno uso di impianti di irraggiamento della tipologia sopra indicata. L'uso di tali tecniche richiede oltre alla conoscenza delle probabilità di guasto dei vari componenti del sistema anche delle probabilità legate all'errore umano. Per la valutazione di queste ultime sono state utilizzate due distinte formulazioni della metodologia CREAM (Cognitive Reliability and Errors Analysis Method).

Nell'articolo vengono presentati i risultati ottenuti, facendone un confronto critico.

1. INTRODUZIONE

La International Commission on Radiological Protection (ICRP) ha dedicato molta attenzione ai rischi di esposizione che possono comportare l'assunzione di dosi accidentali o non intenzionali alla popolazione o agli operatori che prestano il loro servizio all'interno di impianti di irraggiamento o impianti dotati di acceleratore [1-3]. In particolare, nell'ICRP n° 97 del 2005 vengono individuate due principali modalità di esposizione: la prima, detta esposizione normale, che, anche se ha una elevata probabilità di accadimento, comporta dosi minime comunemente ritenute accettabili per la categoria; la seconda su cui si pone particolare attenzione, detta esposizione potenziale, definita come quella esposizione che, sebbene non avvenga in maniera altamente probabile, può avere conseguenze molto gravi. Inoltre, viene messo in risalto che le cause più frequenti che conducono ad esposizioni potenziali sono quelle legate agli errori umani commessi dagli operatori; seguono i guasti legati al malfunzionamento dei componenti elettronici, la presenza di pezzi difettosi, la cattiva manutenzione ed i problemi legati al trasporto ed al maneggiamento.

Nell'ambito del presente lavoro, utilizzando le tecniche ad alberi di guasto, si sono indagate quelle situazioni incidentali che nel settore industriale sopra indicato possono condurre ad esposizione potenziale (Top Event, TE) individui che, per la loro occupazione, si trovino all'interno di tali strutture. Le analisi sono state condotte mediante l'uso del codice Treezzy [4], sviluppato presso il Dipartimento di Ingegneria Nucleare di Palermo, che permette di effettuare analisi di sicurezza tramite tecniche ad albero di guasto o ad alberi degli eventi, utilizzando procedure, oltre che di tipo classico, anche di tipo sfumato. L'impianto preso a riferimento riguarda un irradiatore dotato di sorgente gamma, tipicamente utilizzato nell'industria di sterilizzazione di prodotti sanitari compresi quelli farmaceutici, o per l'irraggiamento di prodotti agricoli ed alimentari. Si contano almeno 200 impianti di questo tipo negli stati membri dell'International Atomic Energy Agency (IAEA), di cui quattro in Italia.

Come noto, per l'analisi mediante la tecnica ad alberi di guasto si richiede la conoscenza delle probabilità di guasto dei vari componenti del sistema in esame, oltre che la quantificazione della probabilità

dell'errore umano che implica la conoscenza di una serie di fattori oggettivi, come le condizioni e l'organizzazione del posto di lavoro, e soggettivi, come l'addestramento, il livello di distrazione, di non facile determinazione.

Nell'ambito della *Human Reliability Analysis (HRA)*, negli ultimi anni sono state messe a punto un certo numero di metodologie avanzate per la valutazione dei fattori che influenzano i comportamenti degli operatori e buona parte di queste studiano le caratteristiche ambientali insieme alle capacità e le conoscenze richieste al personale per eseguire le procedure. Tra le varie tecniche, molto nota è la metodologia CREAM (Cognitive Reliability and Errors Analysis Method), basata su una struttura multidisciplinare che considera sia il fattore umano (ad esempio: interfaccia uomo-macchina, contenuto e formato di procedure e addestramento) sia le condizioni dell'impianto che danno origine alle necessità di azioni ed operazioni nell'interazione uomo-sistema (ad esempio: indicazioni ingannevoli, indisponibilità di attrezzature ed altre configurazioni inusuali).

Nel presente lavoro, poiché negli scenari incidentali analizzati il fattore umano contribuisce in maniera significativa alla probabilità di esposizione potenziale, sono state condotte diverse analisi in cui la valutazione dell'errore umano è stata effettuata adoperando due distinte formulazioni della metodologia CREAM [5, 6]. Ciò ha consentito di eseguire un confronto critico sulla validità ed accuratezza della probabilità del TE ottenuta utilizzando due approcci, sostanzialmente differenti, della stessa metodologia per la valutazione dell'affidabilità umana.

2. LA METODOLOGIA CREAM

Come è noto, la metodologia CREAM consente di valutare la probabilità dell'errore umano ponendo la massima attenzione sul livello di controllo che l'operatore possiede dello scenario in cui è richiesta l'azione da svolgere. Tale tecnica deriva dal modello "Contextual Control Model" (COCOM) [7], la cui premessa elementare è che l'azione umana viene largamente determinata dalla situazione, cioè da fattori come: il contesto, l'esperienza sulle azioni da svolgere, l'aspettativa del risultato e la disponibilità di mezzi o di strumenti. Nella tecnica CREAM, in modo ancor più specifico rispetto al modello COCOM, le stime delle probabilità di errore vengono determinate mediante uno studio attento del contesto in cui l'operatore effettua il suo compito. Ciascuna modalità di controllo ha il suo corrispondente intervallo di probabilità di errore (Tabella1), basato sulla seguente classificazione COCOM:

- *Scrambled*: caratterizza una situazione non prevedibile, dove l'operatore non ha controllo oppure, non ha un'azione pianificata da compiere.
- *Opportunistic*: definito da azioni limitanti, dalla scarsa conoscenza e competenza del personale e da condizioni ambientali non standard.
- *Tactical*: caratterizza azioni pianificate, dove l'operatore conosce regole e procedure del sistema e porta a termine l'azione da compiere.
- *Strategic*: definito come "visione globale", dove l'operatore ha a disposizione lunghi tempi per la pianificazione del suo lavoro, per cui potrà valutare il risultato in maniera più precisa e considerare le relazioni tra azioni e conseguenze.

Tabella 1. Intervalli di probabilità di errore classificati sulla base dei vari modi di controllo.

Modi di controllo	Probabilità di errore nel compiere l'azione
Strategic	$0.5 \times 10^{-3} < p < 1 \times 10^{-2}$
Tactical	$1 \times 10^{-3} < p < 1 \times 10^{-1}$
Opportunistic	$1 \times 10^{-2} < p < 0.5 \times 10^0$
Scrambled	$1 \times 10^{-1} < p < 1 \times 10^0$

La tecnica CREAM valuta la probabilità di errore umano sulla base della classificazione sopra riportata facendo ricorso ai CPC (Common Performance Conditions) che definiscono i seguenti nove fattori per la identificazione del contesto:

- *Adeguate organizzazione*, definisce la qualità dei ruoli e le responsabilità dei membri della squadra;
- *Condizione di lavoro*, descrive la natura e le condizioni fisiche dell'ambiente di lavoro, come luminosità, rumori, allarmi, ecc.;

- *Adeguate rapporto uomo-macchina e supporto operativo*, definisce il rapporto interfaccia uomo-macchina, includendo le informazioni fornite dai manuali;
- *Disponibilità di piani e procedure*, descrive le procedure ed i piani di lavoro, includendo le procedure normali e di emergenza;
- *Numero di scopi simultanei*, quantifica i compiti che il singolo operatore deve svolgere;
- *Tempo disponibile*, corrisponde al tempo disponibile a compiere un determinato compito;
- *Ora del giorno*: denota l'intervallo di tempo del giorno o della notte in cui il compito viene eseguito;
- *Adeguate formazione ed esperienza*, descrive il livello e la qualità della formazione del personale, come, ad esempio, la conoscenza delle nuove tecnologie;
- *Qualità del gruppo di lavoro*, definisce l'attitudine alla collaborazione del gruppo di lavoro, includendo il livello di fiducia ed, in generale, il clima sociale che si instaura nel gruppo stesso.

Ciascun CPC è caratterizzato da un numero finito di livelli di controllo (ad esempio: “veramente efficiente”, “efficiente”, “inefficiente”, “non significativa”, ecc.), che definiscono qualitativamente, in modo positivo, negativo o nullo, gli effetti che il CPC esaminato ha sull'azione svolta (Tabella 2).

Tabella 2. Fattori di influenza della modalità di controllo dell'azione, CPC.

CPC number	CPC name	Level/descriptors	Expected effect on Performance reliability
1	Adequacy of Organization	Deficient Inefficient Efficient Very Efficient	Reduced Reduced Not Significant Improved
2	Working Conditions	Incompatible Compatible Advantageous	Reduced Not Significant Improved
3	Adequacy of Man Machine Interface (MMI) and operational support	Inappropriate Tolerable Adequate Supportive	Reduced Not Significant Not Significant Improved
4	Availability of procedures/ plans	Inappropriate Acceptable Appropriate	Reduced Not Significant Improved
5	Number of simultaneous goals	More than actual capacity Matching current capacity Fewer than actual capacity	Reduced Not Significant Not Significant
6	Available Time	Continuously inadequate Temporarily inadequate Adequate	Reduced Not Significant Improved
7	Time of the day (circadian rhythm)	Night Day	Reduced Not Significant
8	Adequacy of training and experience	Inadequate Adequate with limited experience Adequate with high experience	Reduced Not Significant Improved
9	Crew collaboration quality	Deficient Inefficient Efficient Very Efficient	Reduced Not Significant Not Significant Improved

La procedura di valutazione della probabilità consiste nel sommare per i nove CPC i livelli che contribuiscono positivamente (Σ_{improved}) e quelli che contribuiscono negativamente (Σ_{reduced}), ottenendo una coppia di valori che nel grafico di Figura 1 individua una delle quattro categorie delle modalità di controllo descritte in Tabella 1.

È evidente che l'individuazione di un intervallo di probabilità pone, comunque, delle difficoltà quando è necessario procedere con analisi di sicurezza di tipo quantitativo. Ciò ha portato vari Autori a proporre diversi modelli della metodologia CREAM intesi a valutare una singola probabilità per l'errore umano.

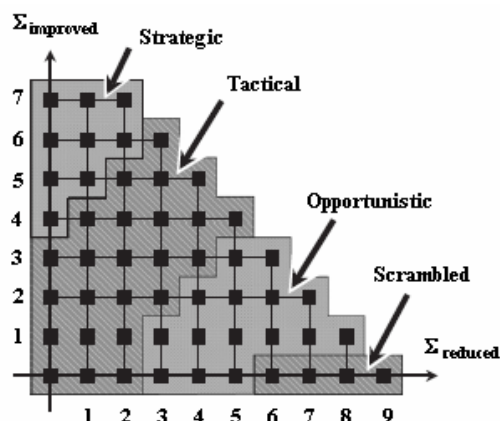


Figura 1. Relazione fra i CPC ed i modi di controllo

2.1 Metodologia CREAM modificata mediante l'uso di tecniche sfumate

Come già detto, il fattore umano e le condizioni del sistema non possono essere considerati indipendenti tra loro poiché a volte essi si influenzano in modo non ben definito. Ovviamente, questo aspetto complica la possibilità di una descrizione ed identificazione della modalità con cui può essere commesso un errore.

Sulla base di queste considerazioni ed utilizzando la tecnica CREAM, in [5] viene proposto un approccio di tipo sfumato per la definizione dei CPC. La procedura consiste nell'associare ai vari livelli di ogni CPC un intervallo sfumato, definito da funzioni di partenza di tipo triangolare, con valori compresi fra 0 e 100, in cui l'estremo inferiore e l'estremo superiore indicano, rispettivamente, la peggiore e la migliore condizione nello svolgimento del compito. Soltanto il CPC "time of day" ha un intervallo sfumato compreso tra 0 e 24, essendo, come già detto, correlato all'ora del giorno in cui viene svolta l'azione. Anche gli intervalli di probabilità di errore, definiti sulla base dei modi di controllo riportati in Tabella 1, vengono rappresentati mediante funzioni di appartenenza di tipo triangolare così come mostrato in Figura 2, dove per motivi di convenienza si è fatto uso di una rappresentazione logaritmica per l'asse delle ascisse.

I CPC così decomposti vengono combinati utilizzando regole sfumate del tipo "if-then-else" (inferenza fuzzy) sulla base della logica CREAM, per cui ad ogni combinazione dei nove parametri CPC viene assegnato un output sfumato delle probabilità di errore umano, sulla base delle modalità di controllo. Il risultato verrà poi "defuzzificato" mediante l'uso del metodo del centroide [9].

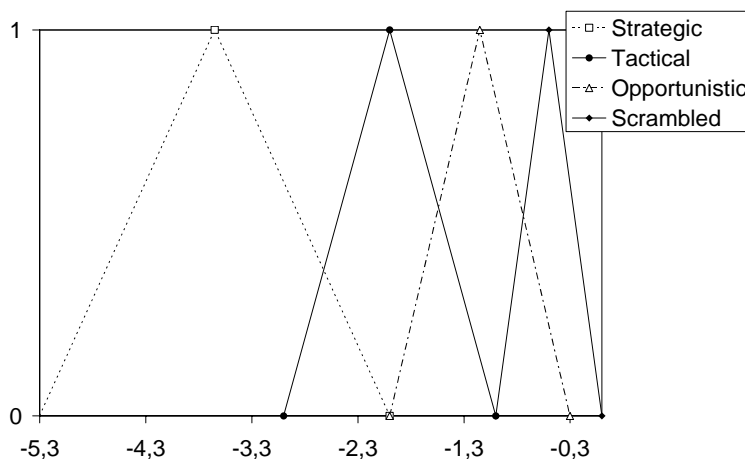


Figura 2. Rappresentazione dell'output sfumato della probabilità di errore umano.

2.2 Metodologia CREAM semplificata

In [6] gli Autori propongono di estendere la metodologia CREAM sulla base di quattro funzioni co-

gnitive (Osservazione, Interpretazione, Pianificazione, Esecuzione) a cui corrispondono tredici generici tipi di guasto o errore, definiti come “Cognitive Failure Probability” (CFP₀) [8], il cui valore base della probabilità è riportato in Tabella 3.

Tabella 3. Tipi di funzioni cognitive e valori base della probabilità di errore, CFP₀

Cognitive function	Generic failure type	CFP ₀ basic value
Observation	O1. Wrong object observed	0.001
	O2. Wrong identification	0.007
	O3. Observation not made	0.007
Interpretation	I1. Faulty diagnosis	0.02
	I2. Decision error	0.01
	I3. Delayed interpretation	0.01
Planning	P1. Priority error	0.01
	P2. Inadequate plan	0.01
Execution	E1. Action of wrong type	0.003
	E2. Action at wrong time	0.003
	E3. Action on wrong object	0.0005
	E4. Action out of sequence	0.003
	E5. Missed action	0.003

La prima parte della procedura consiste nel valutare il parametro β , definito indice di influenza del contesto (Context Influence Index), come differenza della somma dei livelli dei CPC che comportano effetti peggiorativi sull'azione (Σ_{reduced}) e la somma dei livelli dei CPC che comportano effetti migliorativi (Σ_{improved}):

$$\beta = X - Y = \Sigma_{\text{reduced}} - \Sigma_{\text{improved}} \quad (1)$$

L'insieme delle rette $Y = X - \beta$ individuano le modalità di controllo che l'operatore ha sull'azione da svolgere come rappresentato nel grafico di Figura 3. Quindi, se il valore di β è, ad esempio, uguale a zero (retta bisettrice di Figura 3), ciò vuol dire che il numero dei livelli peggiorativi è uguale al numero dei livelli migliorativi, oppure tutti i livelli sono insignificanti.

La correlazione fra i vari CFP ed il parametro β viene effettuata assumendo che le interazioni umane possono essere descritte attraverso una funzione di tipo logaritmico, per cui è possibile scrivere la seguente relazione:

$$\log\left(\frac{\text{CFP}}{\text{CFP}_0}\right) = \kappa\beta \quad (2)$$

Poiché nella tecnica CREAM il massimo numero dei CPC peggiorativi è $\beta_{\text{max}} = 9$, mentre quello minimo dei CPC migliorativi è pari a $\beta_{\text{min}} = -7$ ed, inoltre, ritenendo ragionevole assumere $\text{CFP}_{\text{max}} = 1.0$ e $\text{CFP}_{\text{min}} = 0.0001$, gli Autori utilizzano l'Eq. (2) insieme alle condizioni appena descritte per ricavare la costante κ come:

$$\kappa = \frac{\log\left(\frac{\text{CFP}_{\text{max}}}{\text{CFP}_{\text{min}}}\right)}{\beta_{\text{max}} - \beta_{\text{min}}} = 0.25 \quad (3)$$

Noto κ , dall'Eq. 2 è possibile ricavare l'espressione finale per la probabilità dell'errore, cioè:

$$\text{CFP} = \text{CFP}_0 \cdot 10^{0.25\beta} \quad (4)$$

La seconda parte della procedura consiste nella sostituzione del parametro β , sostituzione intesa ad attribuire valori diversificati all'influenza dei singoli livelli peggiorativi o migliorativi dei parametri CPC, cosa che la tecnica CREAM base non consente. Il nuovo parametro viene definito come $\sum_i \rho_i$ dove i singoli indici ρ_i (Performance Influence Index), rappresentati in Tabella 4, sono stati valutati sulla base di studi che tengono conto del giudizio degli esperti. Quindi, l'Eq. (4) viene ulteriormente modificata come segue:

$$CFP = CFP_0 \cdot 10^{0.25 \sum_i \rho_i} \quad (5)$$

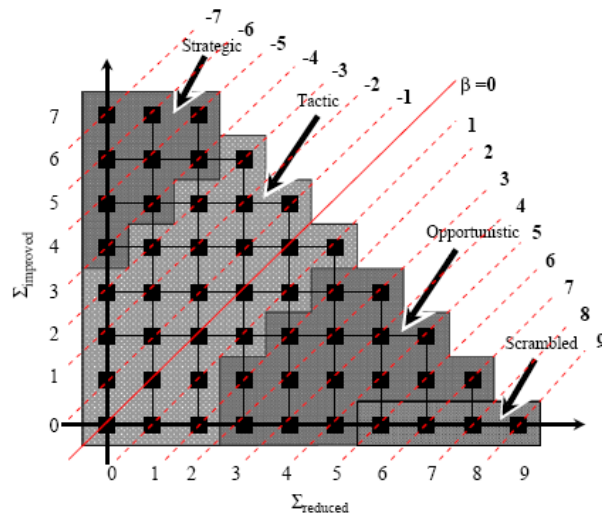


Figura 3. Rette di influenza del contesto che definiscono la modalità di controllo.

Tabella 4. Valori degli indici di influenza, ρ_i , Performance Influence Index.

CPC name	Level	Performance Influence Index
Adequacy of organization	Very efficient	-0.6
	Efficient	0
	Inefficient	0.6
	Deficient	1.0
Working conditions	Advantageous	-0.6
	Compatible	0
	Incompatible	1.0
Adequacy of MMI and operational support	Supportive	-1.2
	Adequate	-0.4
	Tolerable	0
	Inappropriate	1.4
Availability of procedures/plans	Appropriate	-1.2
	Acceptable	0.0
	Inappropriate	1.4
Number of simultaneous goals	Fewer than capacity	0
	Matching current capacity	0
	More than capacity	1.2
Available time	Adequate	-1.4
	Normal	0
	Temporarily inadequate	1.0
	Continuously inadequate	2.4
Time of day	Day-time (adjusted)	0
	Night-time (unadjusted)	0.6
Adequacy of training and Preparation	Adequate, high experience	-1.4
	Adequate, low experience	0
	A little inadequate	1.0
	Inadequate	1.8
Crew collaboration quality	Very efficient	-1.4
	Efficient	0
	Inefficient	0.4
	Deficient	1.4

3. ESPOSIZIONE POTENZIALE IN UN MODERNO IMPIANTO DI IRRAGGIAMENTO

I sistemi di sicurezza e di controllo presi in esame nelle analisi sono quelli generalmente utilizzati nel-

la maggior parte degli irradiator di ultima concezione [1]. Si tratta di un impianto (Figura 4) impiegato per impartire quantità di dose uniformi a prodotti alimentari come frutta, vegetali, carni oppure di uso medico, quali siringhe e garze che necessitano di sterilizzazione. Tali prodotti sono contenuti all'interno di pacchi di opportuna altezza e larghezza che passano una o più volte intorno alla sorgente. In base alla velocità e al numero di passaggi che si compiono si garantisce l'uniformità e l'intensità di dose desiderata su tutti i prodotti contenuti nel pacco.

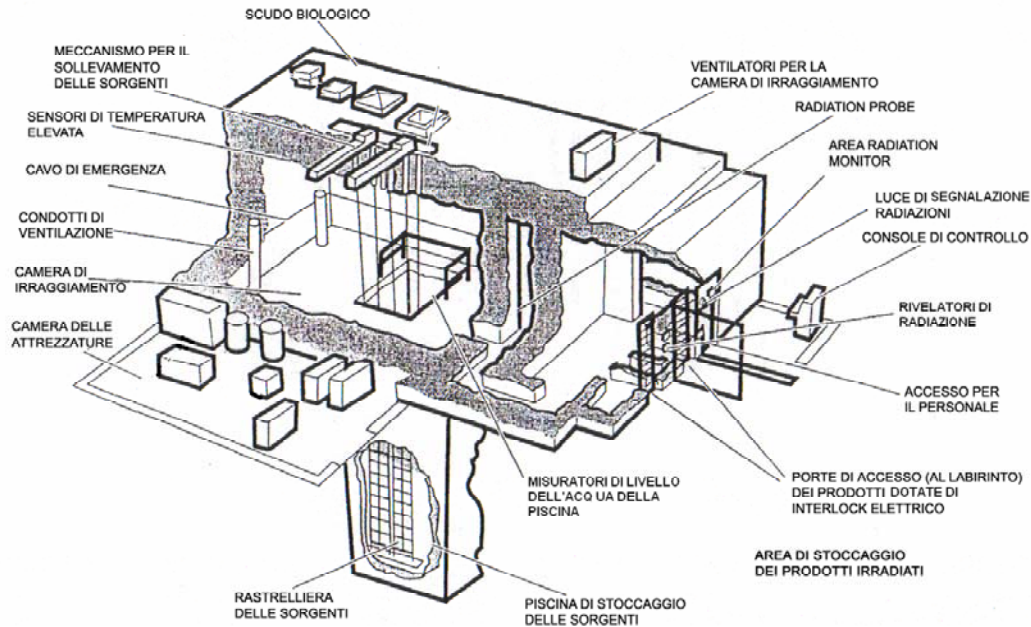


Figura 4. Schema dell'impianto di irraggiamento di concezione moderna.

La sorgente usata è Cobalto 60 ($Co\ 60$), posta su una apposita rastrelliera metallica, di attività pari a circa 40 PBq. Quando l'impianto non è funzionante la sorgente viene ricoverata all'interno di una piscina piena di acqua, che si trova dentro la stanza di irradiazione (*Radiation Room, RR*). Il battente d'acqua assicura un adeguato schermo biologico contro le radiazioni. Inoltre, un misuratore di livello e un opportuno sistema di controllo verificano se tale battente si mantiene tra il valore massimo e il valore minimo consentiti, mentre un dispositivo di rilevazione di radiazioni montato sul fondo della piscina controlla l'esatta posizione delle sorgenti.

La movimentazione dei pacchi è affidata a nastri trasportatori. Prima di arrivare alla stanza di irradiazione, i pacchi seguono un percorso a labirinto per consentire l'attenuazione della radiazione diffusa nella zona di ingresso dei pacchi. All'ingresso del labirinto vengono poste delle catene con *interlock* che ostruiscono il passaggio. Se staccate, il sistema di sollevamento della rastrelliera viene isolato elettricamente, causando il ricovero di emergenza delle sorgenti. L'ingresso nella RR del materiale da irradiare è diverso dall'uscita del materiale irradiato, che è ovviamente posizionata lontano dall'ingresso del personale. Ciascun ingresso ed uscita sono dotati di porte con *interlock* e di rivelatori di radiazione per prevenire ingressi del personale nel locale di irraggiamento non sicuri. Le procedure di avviamento prevedono che l'operatore entri nel locale di irraggiamento per effettuare un sopralluogo che assicuri l'assenza di altro personale all'interno della RR e l'avvio del sistema in sicurezza. Una luce lampeggiante posta sopra la porta di ingresso della RR insieme a un segnale sonoro indicano l'inizio delle operazioni di esposizione della sorgente.

Tutte le chiavi che consentono l'avvio delle procedure di esposizione delle sorgenti sono tenute sotto stretto controllo, in modo da assicurare che per l'operatore sia disponibile soltanto una chiave. Infatti, la stessa chiave viene usata per l'accesso al locale e per l'azionamento di un "timer" posto all'interno della RR. Il "timer" limita il tempo necessario per uscire dalla camera ed avviare le operazioni nella sala di controllo, pena l'interruzione delle operazioni ed il riavviamento delle procedure. Alla chiave è collegato tramite catena un rivelatore di radiazioni portatile per assicurare il monitoraggio dell'operatore ad ogni ingresso nella RR. Pulsanti di emergenza posti all'interno della camera RR se

azionati interrompono la procedura di avviamento in qualunque momento.

Una serie di fotosensori posti sulla porta di ingresso del personale producono un segnale sonoro e luminoso e causano il ricovero delle sorgenti dentro la piscina in caso d'ingresso non sicuro del personale. Infine, tutta l'area della RR viene monitorata tramite telecamera posta vicino la porta di ingresso.

Per ulteriori dettagli sui dispositivi di sicurezza e controllo dell'impianto esaminato si rinvia a [1]

3.1 Descrizione degli scenari incidentali esaminati e risultati ottenuti

Le principali cause, che possono comportare l'esposizione del personale che opera all'interno di un impianto della tipologia esaminata, possono essere descritte dai seguenti scenari:

- A. La sorgente è esposta e l'operatore entra nel locale di irraggiamento attraverso l'ingresso del personale. Tale ipotesi si verifica se l'accesso nella RR è possibile nonostante l'esposizione delle sorgenti, insieme al guasto del rivelatore di radiazioni posto nella RR e del rivelatore portatile, o quest'ultimo viene ignorato;
- B. La sorgente è esposta e l'operatore entra nel locale attraverso l'ingresso dei prodotti da irradiare. L'evento comporta il guasto dei sensori fotoelettrici e del sistema di chiusura della porta di ingresso dei pacchi.
- C. Un frammento di sorgente è trasportato all'esterno del locale d'irradiazione e l'operatore si trova nei pressi del nastro trasportatore. Questo scenario si verifica se si ha la rottura della sorgente e il guasto del rivelatore di radiazioni posto all'uscita dei prodotti irradiati;
- D. La sorgente viene esposta dall'operatore che si trova nella sala di controllo mentre del personale è presente all'interno del locale RR, oppure, per il verificarsi del guasto dei sistemi di controllo di sollevamento della rastrelliera mentre l'operatore è nella RR.

Lo sviluppo dell'albero di guasto viene riportato nelle Figure 5 ÷ 9. I dati di probabilità di guasto dei componenti e dei sistemi di sicurezza dell'impianto (Tabella 5) sono espressi in frazione di tempo (fraction of time, fot), per domanda (per demand, pd) ed evento per anno (y^{-1}). In Tabella 6 sono mostrate le probabilità degli errori umani valutate con le metodologie CREAM descritte in precedenza. È stato ipotizzato che l'operatore entra dentro la RR, attraverso la porta principale, 1700 volte all'anno [1].

Nelle analisi effettuate utilizzando la metodologia *CREAM sfumata*, il personale è stato considerato come altamente qualificato e con un ottimo livello di addestramento, per cui i CPC presi in considerazione con effetto peggiorativo sull'azione da svolgere sono stati quelli riguardanti il "Tempo disponibile", essendo ridotti i tempi per invertire o modificare le operazioni e l'"Ora del giorno", in quanto si è voluto considerare la peggiore condizione in cui si trova ad operare il personale essendo il processo a ciclo continuo. Per quanto riguarda i CPC "Numero di scopi simultanei" e "Disponibilità di piani e procedure" sono stati trattati come "efficienti" ed "accettabili", per cui il loro contributo è non significativo. Ovviamente, per le analisi effettuate adoperando la metodologia *CREAM semplificata* sono stati utilizzati gli indici di influenza corrispondenti ai livelli dei CPC considerati con la tecnica *CREAM sfumata*; mentre per i valori base delle probabilità di errore, CFP_o sono state utilizzate le funzioni cognitive relative alla "Osservazione" ed alla "Esecuzione". Ciò in quanto gli errori presi in esame sono da correlare ad osservazioni erronee o non fatte, oppure, ad azioni omesse o sbagliate, o, ancora, ad operazioni intese a bypassare le procedure. Le analisi dell'albero di guasto del TE, in termini di frequenza all'anno, forniscono i seguenti risultati:

$$P(TE)_{CREAM\ sfumata} = 0,46 \times 10^{-6} y^{-1} \quad (6)$$

$$P(TE)_{CREAM\ semplif.} = 5,15 \times 10^{-6} y^{-1} \quad (7)$$

L'uso delle due tecniche, quindi, porta a valori della probabilità che differiscono tra loro di circa una decade. Questo risultato era, comunque, da attendersi poiché, a parità di probabilità di guasto dei componenti del sistema di controllo e sicurezza dell'impianto, le probabilità di errore umano ricavate con la *CREAM semplificata* sono in media più elevate rispetto alle analoghe ottenute utilizzando la *CREAM sfumata* (vedi Tabella 6).

Si tenga presente che nel rapporto dell'ICRP [1], dove non viene dichiarata la procedura utilizzata, si riporta una probabilità del TE pari a:

$$P(TE)_{ICRP} = 1.9 \times 10^{-6} \text{ y}^{-1} \quad (8)$$

che risulta più prossima al risultato riportato nell'Eq. (7).

Sono stati identificati 17 *Minimal Cut Sets* (MCS) di cui quelli con frequenza più elevata in ordine decrescente sono riportati nelle Tabelle 7 e 8 per le tecniche *CREAM sfumata* e *semplificata*, rispettivamente. Viene riportato, inoltre, il contributo espresso in percentuale che ogni MCS ha sulla frequenza di accadimento del TE.



Figura 5. Livello 0 dell'albero di guasto

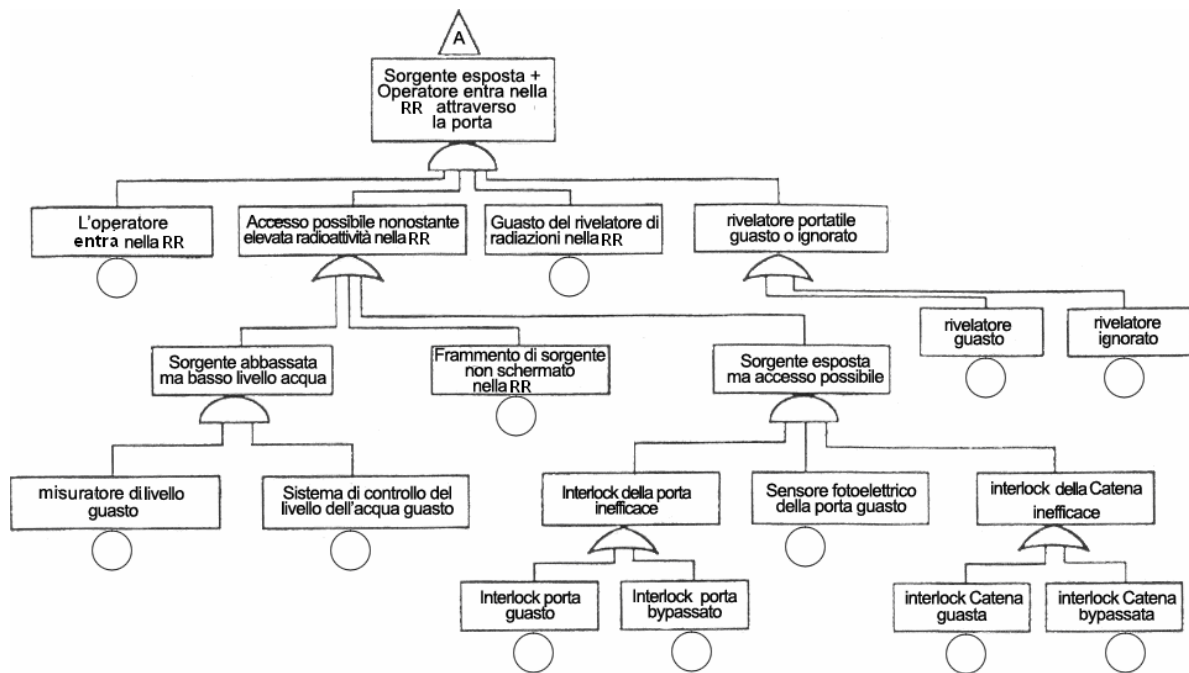


Figura 6. Sviluppo del sotto albero dello scenario A

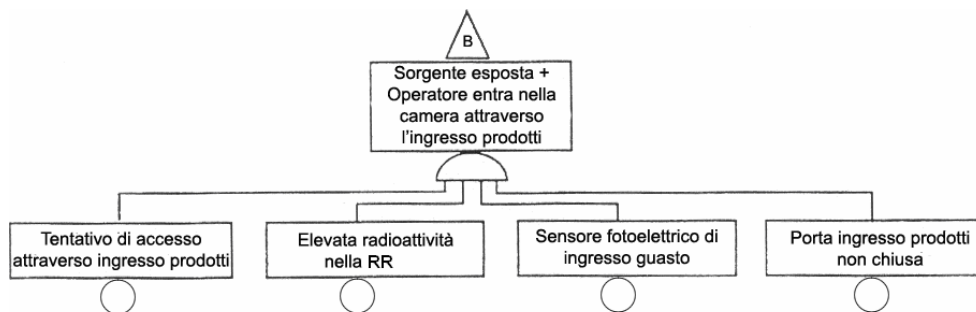


Figura 7. Sviluppo del sotto albero dello scenario B

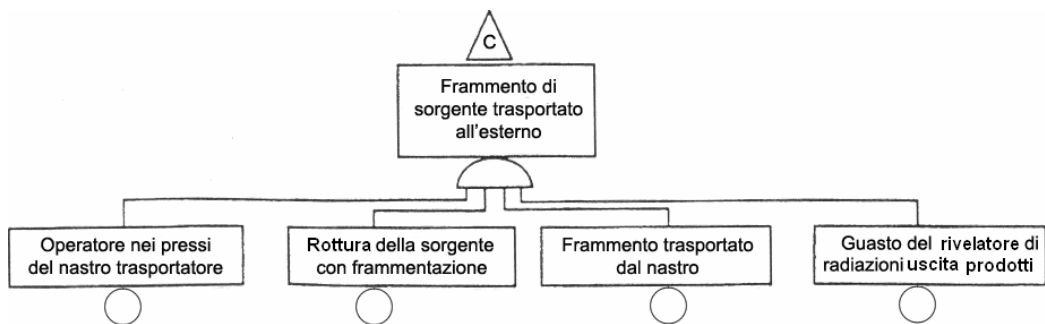


Figura 8. Sviluppo del sotto albero dello scenario C

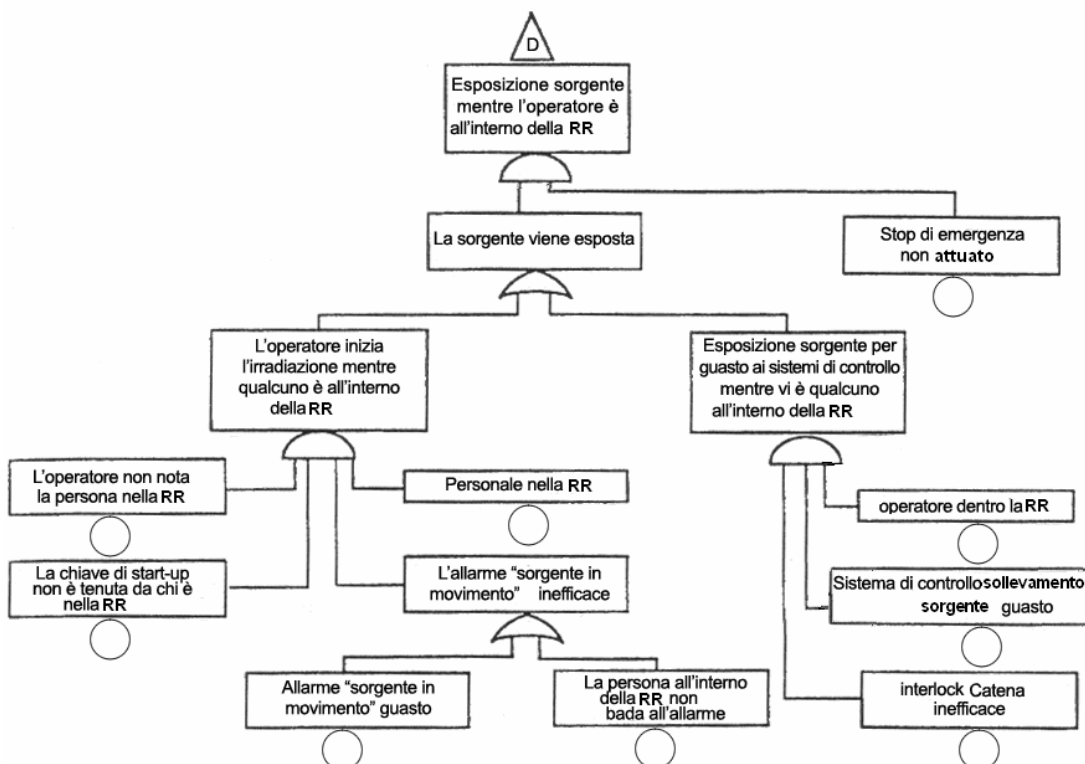


Figura 9. Sviluppo del sotto albero dello scenario D

Tabella 5. Dati di probabilità dei componenti e dei sistemi di sicurezza dell'impianto preso in esame.

Evento Primario	Dato	Evento Primario	Dato
Guasto rivelatore di radiazioni della RR	1×10^{-3} pd	Guasto del sistema di controllo del livello dell'acqua	1×10^{-4} fot
Frammento di sorgente non schermato nella RR	4×10^{-7} fot	Guasto del sensore fotoelettrico della porta di ingresso della RR	5×10^{-3} pd
Elevata radioattività nella RR	8×10^{-1} fot	Guasto del rivelatore portatile	1×10^{-5} pd
Guasto del misuratore di livello	1×10^{-5} pd	Operatore dentro la camera RR	5×10^{-2} fot
La porta di ingresso dei prodotti non si chiude	1×10^{-4} pd	Guasto dei sistemi di controllo di sollevamento sorgente	3×10^{-1} /y
Operatore nei pressi del nastro trasportatore	8×10^{-1} fot	Interlock della catena inefficace	1×10^{-2} pd
Rottura della sorgente con frammentazione	6×10^{-4} /y	Guasto dell'interlock della porta	5×10^{-3} fot
Frammento di sorgente trasportato dal nastro	2×10^{-1} pd	Guasto allarme "sorgente in movimento"	1×10^{-4} pd
Guasto rivelatore di radiazioni uscita prodotti	1×10^{-3} pd	Interlock della catena guasto	5×10^{-3} fot

Tabella 6. Probabilità degli errori umani valutati con la tecnica CREAM sfumata e semplificata.

Evento Primario	CREAM sfumata	CREAM semplificata
Interlock della porta bypassato	2.19×10^{-3}	1.178×10^{-2}
Rivelatore di radiazioni portatile ignorato	1.71×10^{-2}	6.67×10^{-3}
L'operatore tenta di entrare nella RR attraverso l'ingresso prodotti	1.00×10^{-2}	1.63×10^{-2}
La persona all'interno della RR non bada all'allarme	2.19×10^{-3}	1.178×10^{-2}
Interlock della catena bypassato	2.19×10^{-3}	1.178×10^{-2}
Stop di emergenza non attuato	2.19×10^{-3}	1.178×10^{-2}
L'operatore non nota una persona all'interno della RR	3.60×10^{-3}	2.13×10^{-2}
La chiave di start-up non è tenuta da chi è nella RR	2.19×10^{-3}	1.178×10^{-2}

Tabella 7. MCS valutati dall'analisi FT in cui è stata usata la tecnica CREAM sfumata.

N° MCS	Percentuale %	Frequenza	Descrizione eventi dei MCS
5	72.14	3.29×10^{-7}	<ul style="list-style-type: none"> • Guasto dei sistemi di controllo di sollevamento sorgente • Operatore dentro la camera RR • Interlock della catena inefficiente • Stop di emergenza non attuato
4	21.05	9.60×10^{-8}	<ul style="list-style-type: none"> • Operatore nei pressi del nastro trasportatore • Frammento di sorgente trasportato dal nastro • Rottura della sorgente con frammentazione • Guasto rivelatore di radiazioni uscita prodotti
2	2.54	1.16×10^{-8}	<ul style="list-style-type: none"> • Operatore entra nella RR • Guasto rivelatore di radiazioni della RR • Rivelatore delle radiazioni portatile ignorato • Frammento di sorgente nella camera RR non schermata
3	0.8	4.0×10^{-9}	<ul style="list-style-type: none"> • Elevate radioattività nella RR • Operatore entra dall'ingresso prodotti • Guasto del sensore fotoelettrico • Porta ingresso prodotti non chiusa

Tabella 8. MCS valutati dall'analisi FT in cui è stata usata la tecnica CREAM semplificata.

N° MCS	Percentuale %	Frequenza	Descrizione eventi dei MCS
5	51,8	$2,67 \times 10^{-6}$	<ul style="list-style-type: none"> • Guasto dei sistemi di controllo di sollevamento sorgente • Operatore dentro la camera RR • Interlock della catena inefficiente • Stop di emergenza non attuato
8	39,2	$2,02 \times 10^{-6}$	<ul style="list-style-type: none"> • L'operatore non nota la persona all'interno della RR • Stop di emergenza non attuato • Operatore dentro la camera RR • La persona all'interno della RR non bada all'allarme • La chiave di start-up non è tenuta da chi è nella RR
12	3,6	$1,8 \times 10^{-7}$	<ul style="list-style-type: none"> • Operatore entra nella RR • Interlock della porta bypassato • Guasto del sensore fotoelettrico della porta di ingresso della RR • Interlock della catena bypassato • Guasto rivelatore di radiazioni della RR • Rivelatore di radiazioni portatile ignorato
4	1,9	9.60×10^{-8}	<ul style="list-style-type: none"> • Operatore nei pressi del nastro trasportatore • Frammento di sorgente trasportato dal nastro • Rottura della sorgente con frammentazione • Guasto rivelatore di radiazioni uscita prodotti

In tutti i MCS riportati nelle tabelle precedenti individuiamo la presenza di eventi connessi all'errore umano. In particolare, con la *CREAM sfumata*, i *cut-sets* identificati con i numeri 5 e 4, i quali risultano avere il maggior peso nel verificarsi della probabilità del TE, riguardano i seguenti scenari incident-

tali:

- esposizione dell'operatore presente nella RR causato dal guasto del sistema di controllo di sollevamento delle sorgenti e dell'*interlock* della catena e dal non azionamento del pulsante di emergenza che interrompere le operazioni di avvio;
- rottura della sorgente con frammentazione e trasporto al di fuori della camera RR mentre un operatore si trova nei pressi del nastro trasportatore.

Nella tecnica *CREAM semplificata* si ritrova il *cut set* numero 5 e quello identificato con il numero 8. Quest'ultimo è legato alla distrazione dell'operatore il quale avvia la procedura di esposizione delle sorgenti non avendo notato la presenza di personale dentro la RR, mentre l'operatore dentro la RR non nota la segnalazione luminosa e sonora dei sistemi di allarme e, pertanto, non aziona i dispositivi di sicurezza e di emergenza posti all'interno della sala (pulsante di emergenza e l'*interlock* della catena del labirinto).

Dai risultati ottenuti si può notare che l'uso delle due tecniche portano a risultati che possono essere considerati coerenti. La tecnica *CREAM semplificata* calcola, comunque, una probabilità di accadimento del TE più elevata, mentre alcuni degli eventi critici legati all'errore umano sono risultati diversi da quelli individuati con l'uso della *CREAM sfumata*.

4. CONCLUSIONI

Nel presente articolo sono stati riportati i risultati ottenuti dall'analisi di sicurezza, mediante l'uso di tecniche ad alberi di guasto, di uno scenario incidentale che comporta l'esposizione di operatori che svolgono la loro attività all'interno di un moderno impianto di irraggiamento.

Poiché l'esperienza conferma che le principali modalità di esposizione sono legate a fattori oggettivi, come le condizioni, l'organizzazione del posto di lavoro, ecc..., e soggettivi, come l'addestramento, il livello di distrazione, ecc, per la valutazione delle probabilità dell'errore umano sono state utilizzate due distinte formulazioni della metodologia CREAM. Le analisi sono state condotte mediante l'uso del codice TREEZZY.

I risultati ottenuti con entrambe le analisi hanno messo in evidenza che l'operatore e, quindi, il fattore umano sono un elemento imprescindibile e non trascurabile nella valutazione della probabilità degli scenari incidentali esaminati. È da notare che tra gli eventi connessi all'errore dell'operatore quelli più significativi individuati utilizzando la tecnica *CREAM sfumata* sono legati all'omissione mentre utilizzando la *CREAM semplificata* troviamo sia quelli legati all'omissione, sia quelli dovuti all'esecuzione e alla distrazione. Quindi, quest'ultima risulta più cautelativa perché considera uno spettro più ampio nelle tipologie di errore umano.

BIBLIOGRAFIA

- [1] ICRP Publication 76, *Protection from exposures, International Commission on Radiological Protection, Annals of the ICRP*, vol. 27 N°2, 1997
- [2] ICRP Publication 86 (Annals of the ICRP, Vol 30, N°3, 2000)
- [3] ICRP Publication 97 (Annals of the ICRP, Vol 35, N°2, 2005)
- [4] S. Bellini, M. C. Casamirra, F. Castiglia, M. Giardina, *TREEZZY2, a Fuzzy Logic Computer Code for Fault Tree and Event Tree Analyses*, 7th International Conference on Probabilistic Safety Assessment and Management, 14-18/06/2004, Berlin, Germany.
- [5] M. Konstandinidou, Z. Nivolianitou, C. Kiranoudisa, N. Markatos, *A fuzzy modelling application of CREAM methodology for Human reliability analysis*, *Reliability Engineering and System Safety*, 91, 706-716, 2006.
- [6] X. He, Y. Wang, Z. Shen, X. Huang, *A simplified CREAM prospective quantification process and its application*, *Reliability Engineering and System Safety*, 93, 298-306, 2008.
- [7] E. Hollnagel, *Cognitive reliability and error analysis method (CREAM)*. Amsterdam: Elsevier Science Ltd., 1998.
- [8] Hollnagel E, Cacciabue PC. *Cognitive modelling in system simulation*. Proceedings of the Third European Conference on Cognitive Science Approaches to Process Control, Cardiff, 2-6 September 1991.