

ESPOSIZIONE POTENZIALE IN IMPIANTI DI IRRAGGIAMENTO: UN'ANALISI MEDIANTE PROBABILITÀ DI TIPO SFUMATO

S. Bellini, F. Castiglia, M. Giardina, E. Tomarchio

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

castiglia@din.unipa.it

SOMMARIO

Gli impianti di irraggiamento vengono impiegati per numerose applicazioni industriali come, ad esempio, la sterilizzazione di materiale medico e la decontaminazione di matrici alimentari, per attività nel campo diagnostico e terapeutico nel settore della medicina nucleare, e per ricerche che spaziano dal settore biologico a quello molecolare.

Poiché questi impianti possono essere potenziali fonti di rischio per la salute degli individui in termini di esposizione a fasci di radiazioni o particelle di elevata intensità, vari organi nazionali ed internazionali di regolamentazione e controllo hanno rivolto la loro attenzione allo studio dei sistemi di sicurezza che possano garantire standard di protezione elevati. In questo ambito, la ICRP (International Commission on Radiological Protection) ha dedicato molta attenzione ai rischi di esposizione della popolazione e dei lavoratori che prestano la loro opera all'interno dei laboratori, per diverse tipologie di impianti di irraggiamento[1].

Nel presente articolo vengono riportati i risultati ottenuti dalle analisi di sicurezza, effettuate facendo uso della tecnica ad alberi di guasto, di un ipotetico scenario incidentale che comporta l'esposizione degli operatori che svolgono la loro attività in un impianto di irraggiamento con sorgente radioattiva.

Le analisi sono state condotte mediante l'uso del codice TREEZZY2, sviluppato presso il Dipartimento di Ingegneria Nucleare dell'Università degli Studi di Palermo [2-5], che consente di adottare, oltre che probabilità classiche, anche probabilità di tipo sfumato. Queste ultime sono state adottate per prendere in considerazione i comportamenti umani come, ad esempio, l'incuria, l'errore, ecc., ed i dati di guasto di quei componenti per i quali possono essere utilizzate solo le informazioni fornite dall'esperienza operativa, o giudizi di esperti del settore o, ancora, altre fonti di informazione. Per la loro stessa natura, alcune di queste fonti di informazione non possono fornire dati numericamente precisi, ma solo ipotesi soggettive e qualitative, affette da imprecisione ed incertezza.

L'analisi dei risultati ottenuti mette in evidenza che il fattore umano può rivelarsi il contributo più importante alla probabilità di una esposizione potenziale.

2. ESPOSIZIONE POTENZIALE

La ICRP ha suddiviso le condizioni che possono comportare l'esposizione alle radiazioni di individui in due grandi categorie: esposizione dovuta agli interventi di tipo straordinario ed esposizione dovuta alle ordinarie procedure di lavoro. Quest'ultima categoria è, a sua volta, divisa in esposizione normale ed esposizione potenziale.

L'*esposizione normale*, causata dalle normali operazioni di lavoro o da eventi non intenzionali, è caratterizzata da conseguenze limitate ma probabilità di accadimento elevate (unitarie o prossime all'unità), mentre l'*esposizione potenziale*, dovuta principalmente ad eccessiva sicurezza acquistata nella pratica, ha probabilità di accadimento alquanto basse ma conseguenze elevate.

Quindi, le analisi di sicurezza legate all'esposizione potenziale comportano l'individuazione degli eventi critici che, negli ipotetici scenari o sequenze incidentali, possono condurre ad una grave esposizione del lavoratore. Evidentemente, sulla base dei risultati ottenuti, è possibile cogliere suggerimenti su come e cosa fare per evitare o limitare gli incidenti di esposizione. Ciò, eventualmente, mediante l'introduzione o il miglioramento dei sistemi di sicurezza, o l'adozione di particolari e ben determinate procedure per l'accesso al locale di irraggiamento.

3. PROBABILITÀ FUZZY

Come accennato nei paragrafi precedenti, nell'ambito delle analisi di sicurezza spesso si ha a che fare con dati probabilistici non precisi, sia perché ricavati da un numero insufficiente di informazioni, sia perché ottenuti da valutazioni di "esperti del settore", i quali si basano su conoscenze acquisite su pezzi "similari".

Quindi, capita non di rado di avere a che fare con informazioni fornite mediante espressioni del tipo “circa...”, “attorno a...” e così via.

Inoltre, la stima del fattore umano non è un compito semplice e, comunque, non generalizzabile, in quanto questo dipende fortemente da una serie di complessi fattori oggettivi e soggettivi, quali la stanchezza, la distrazione o il livello di addestramento dell’operatore.

Ciò, ovviamente, conduce a non poche difficoltà nelle analisi di sicurezza di scenari incidentali che includano il comportamento umano (specie nel caso di esposizione alle radiazioni, dove esso potrebbe essere dominante), soprattutto se si fa uso di strumenti basati sulla logica classica e sull’analisi statistica, che, come è noto, richiedono una stima precisa ed attenta della probabilità che una data azione (o omissione) si produca.

Su questa base, l’uso della logica fuzzy [6] consente di tener conto dell’imprecisione nella stima di tali probabilità tramite la definizione di probabilità fuzzy, che esprimono quanto vago è il dato di probabilità che si sta trattando, indicando mediante l’uso dei numeri fuzzy in che misura questo dato è vero o falso.

Come è noto, i numeri fuzzy sono insiemi costituiti da elementi che appartengono all’insieme stesso in diversa misura l’uno dall’altro: un elemento può appartenere, nello stesso tempo, al suo insieme e all’insieme complementare, ma, ad ognuno di essi in diversa misura. Questi insiemi, quindi, sono caratterizzati da una funzione di appartenenza (membership function) $\mu_p(x)$ dei loro elementi che varia tra 0 e 1, per cui un elemento con membership 0 non appartiene all’insieme, uno con membership 1 vi appartiene totalmente, mentre un elemento con membership compresa tra 0 e 1 vi appartiene in parte.

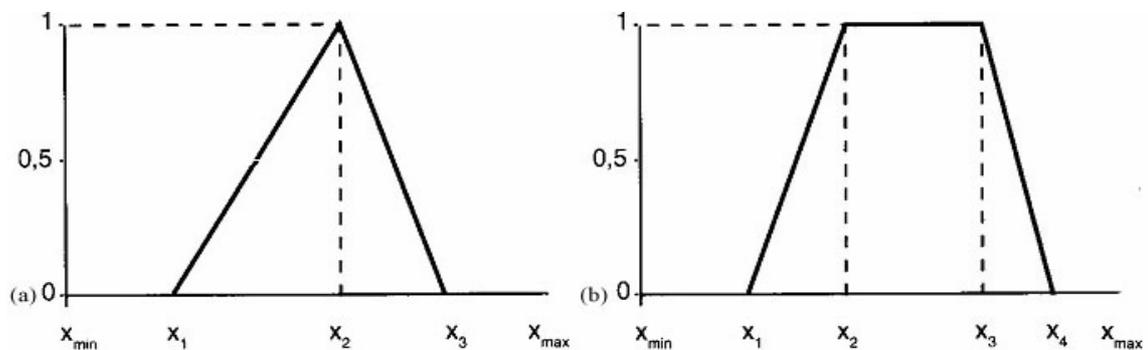


Figura 1. Funzioni di membership per un insieme fuzzy triangolare (a) e trapezoidale (b).

Nell’ambito del presente lavoro, per definire gli insiemi di probabilità fuzzy sono state adottate probabilità fuzzy caratterizzate da funzioni di appartenenza di tipo triangolare.

Tali funzioni vengono definite utilizzando i tre parametri:

$$P=[p_1, p_2, p_3] \tag{1}$$

dove p_1 e p_3 sono rispettivamente il limite inferiore e superiore del numero fuzzy considerato, mentre p_2 è l’elemento che ha il maggior grado di appartenenza. Quindi la funzione di appartenenza può essere espressa secondo le seguenti relazioni:

$$\mu_p(x) = \begin{cases} \frac{x-p_1}{p_2-p_1} & \text{per } p_1 \leq x \leq p_2 \\ \frac{x-p_3}{p_2-p_3} & \text{per } p_2 \leq x \leq p_3 \\ 0 & \text{altrimenti} \end{cases} \tag{2}$$

La funzione di membership può anche essere riscritta in termini di α -cut [7], definendo così un set di intervalli chiusi, che per un insieme fuzzy triangolare assumono la forma:

$$[(p_2 - p_1)\alpha + p_1, (p_2 - p_3)\alpha + p_3] \quad \forall \alpha \in]0,1] \tag{4}$$

dove p_1, p_2 e p_3 sono gli stessi parametri visti in precedenza (1).

Adottare un insieme fuzzy per definire il dato di probabilità significa incorporare nello stesso anche le "informazioni" relative all'incertezza, oltre a rappresentare un primo approccio a probabilità espresse in termini linguistici: un dato di probabilità in termini di triangolo fuzzy rappresenta, infatti, una espressione del tipo "attorno a...", mentre la differenza tra i limiti estremi del set ed il suo elemento centrale rappresenta l'incertezza che si ha relativamente al dato.

4. IL CODICE TREEZZY2

Il codice TREEZZY2 si propone come strumento per lo studio e l'analisi di alberi logici mediante l'uso delle metodologie sfumate, pur consentendo anche l'uso di probabilità di tipo statistico.

Benché in questo lavoro il codice sia stato utilizzato esclusivamente per analisi ad albero di guasto, esso è in grado di effettuare anche analisi ad alberi degli eventi.

Il codice, implementato nel linguaggio Microsoft Visual Basic, offre all'utente le principali funzionalità del sistema operativo Microsoft Windows (barre dei menu e degli strumenti, principali funzioni di salvataggio, apertura e visualizzazione) opportunamente adattate, più alcune altre appositamente realizzate per la descrizione grafica dell'albero di guasto o dell'albero degli eventi relativi alle analisi prese in esame. La costruzione di questi alberi avviene tramite una *tree-view* orizzontale di porte logiche ed eventi primari connessi tra loro, come mostrato in figura 2.

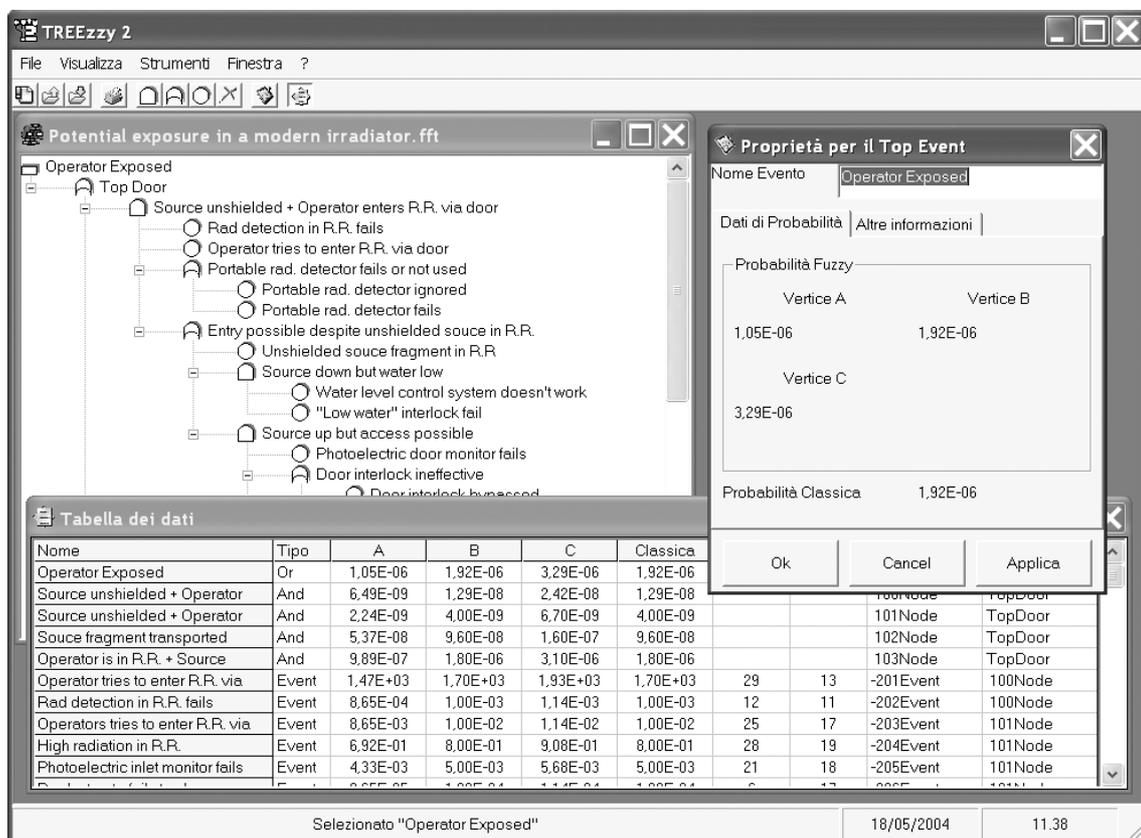


Figura 2. Interfaccia grafica del codice TREEZZY2 per lo studio degli alberi di guasto.

Tramite una opportuna finestra (anch'essa riportata in figura 2, a destra rispetto alla tree-view), è possibile inserire la probabilità classica o sfumata di accadimento di ogni singolo evento. Quindi, l'algoritmo di analisi del codice calcola la probabilità di accadimento del top event di ogni porta AND o OR dell'albero, secondo le regole matematiche tipiche degli insiemi fuzzy, opportunamente implementate; attualmente, le procedure matematiche adottate per il calcolo utilizzano le regole del prodotto algebrico.

Per quanto concerne l'uso della logica sfumata, si noti che il codice consente di effettuare i calcoli attraverso due differenti metodologie: adoperando la cosiddetta approssimazione standard, oppure facendo ricorso alla già citata rappresentazione mediante α -cut.

La prima metodologia consente di operare più rapidamente in quanto utilizza per i calcoli solo i vertici

dell'insieme fuzzy. Il risultato che si ottiene ha la stessa forma degli insiemi fuzzy operandi; la forma finale della funzione di appartenenza risulta, quindi, approssimata. È stato infatti mostrato da Giachetti e Young [7], che la forma dell'insieme fuzzy risultante dal prodotto di due insiemi triangolari non può essere espresso mediante la (2), ma va descritto attraverso curve.

Adoperando il metodo degli α -cut è possibile, invece, ottenere risultati meno approssimati. Come già accennato, con questo metodo la funzione di membership viene riscritta definendo un insieme di intervalli chiusi, come quello riportato in (4). Le espressioni così definite vengono quindi operate utilizzando l'aritmetica degli intervalli [8]. Il prodotto effettuato con questa tecnica viene definito *actual product*. Per costruire la curva che rappresenta l'effettivo risultato dell'operazione, il calcolo va effettuato per $\alpha \in]0,1]$; adoperando questo metodo, si produce un "appesantimento" delle operazioni di calcolo proporzionale al numero di α -cut utilizzati.

Il codice è in grado di procedere in maniera automatica alla determinazione degli insiemi minimi di taglio (minimal cut sets, MCS) dell'albero, e di utilizzarli per ulteriori analisi. La determinazione dei MCS si effettua, come conseguenza del teorema di espansione di Shannon, considerando che un albero di guasto è, nella sua forma più semplice, assimilabile ad un circuito logico. Noi siamo particolarmente interessati a quella che viene chiamata prima forma canonica (o somma di prodotti, SOP), che è formalmente identica all'espressione degli insiemi di taglio minimo di un albero di guasto; per determinare la SOP si fa uso della tabella di verità del circuito logico [9].

È, inoltre, possibile calcolare i cosiddetti indici di importanza fuzzy: FIM (Fuzzy Importance Measure) e FUIM (Fuzzy Uncertainty Importance Measure), per la trattazione dettagliata dei quali si rimanda a [10-11].

Il primo indice rappresenta l'importanza che il contributo del singolo evento assume nella determinazione del risultato finale. Il secondo, invece, rappresenta l'importanza della incertezza su di un singolo evento relativamente all'incertezza totale; questa informazione può essere d'aiuto nel decidere in che direzione procedere nella raccolta di ulteriori informazioni, al fine di abbassare l'incertezza sulla probabilità di fallimento del sistema.

L'analisi comparativa di questi due indici consente di individuare gli elementi critici dello scenario incidentale studiato.

5. ESPOSIZIONE POTENZIALE IN UN IMPIANTO DI IRRAGGIAMENTO EQUIPAGGIATO CON SORGENTI RADIOATTIVE

Gli impianti di irraggiamento di tipo industriale e di concezione moderna sono provvisti di un elevato numero di sistemi di sicurezza progettati per prevenire l'esposizione dei lavoratori.

Questi si sono evoluti nel tempo grazie all'esperienza maturata negli ultimi anni. Inoltre, oggi, l'addestramento del personale operativo è sicuramente più qualificato.

I sistemi di controllo e sicurezza che sono stati presi in considerazione per le nostre analisi sono quelli utilizzati nella maggior parte degli irradiatorii moderni.

Nello specifico (figura 3), l'impianto analizzato è un irradiatore con schermatura delle sorgenti di tipo a piscina, nel quale l'ingresso del materiale da irradiare è diverso dall'uscita del materiale irradiato; ovviamente, tali accessi sono distinti da quelli utilizzati dal personale.

Ciascun ingresso e ciascuna uscita sono chiusi con porte fornite di interlock; ciò dovrebbe prevenire ingressi del personale non sicuri nel locale di irraggiamento. Inoltre, l'operatore deve entrare nel locale di irraggiamento per effettuare una procedura di sopralluogo e chiusura predefinita, prima di poter procedere con l'esposizione delle sorgenti. Questa procedura assicura che il sistema possa essere avviato con sicurezza e che non vi sia personale all'interno del locale in cui la sorgente radioattiva viene esposta.

Va, inoltre, tenuto presente che tutte le chiavi che consentono le operazioni dell'irradiatore sono tenute sotto stretto controllo, in modo da assicurare che solo una chiave sia disponibile per le operazioni in un dato momento. La stessa chiave, richiesta per attivare il pannello di controllo, è utilizzata per l'accesso al locale e per la procedura di start-up: ciò consente di assicurare che le sorgenti non siano esposte prima dell'inizio dell'irraggiamento.

Lo schema riportato in figura 3 mostra altri sistemi di sicurezza e controllo previsti per l'impianto.

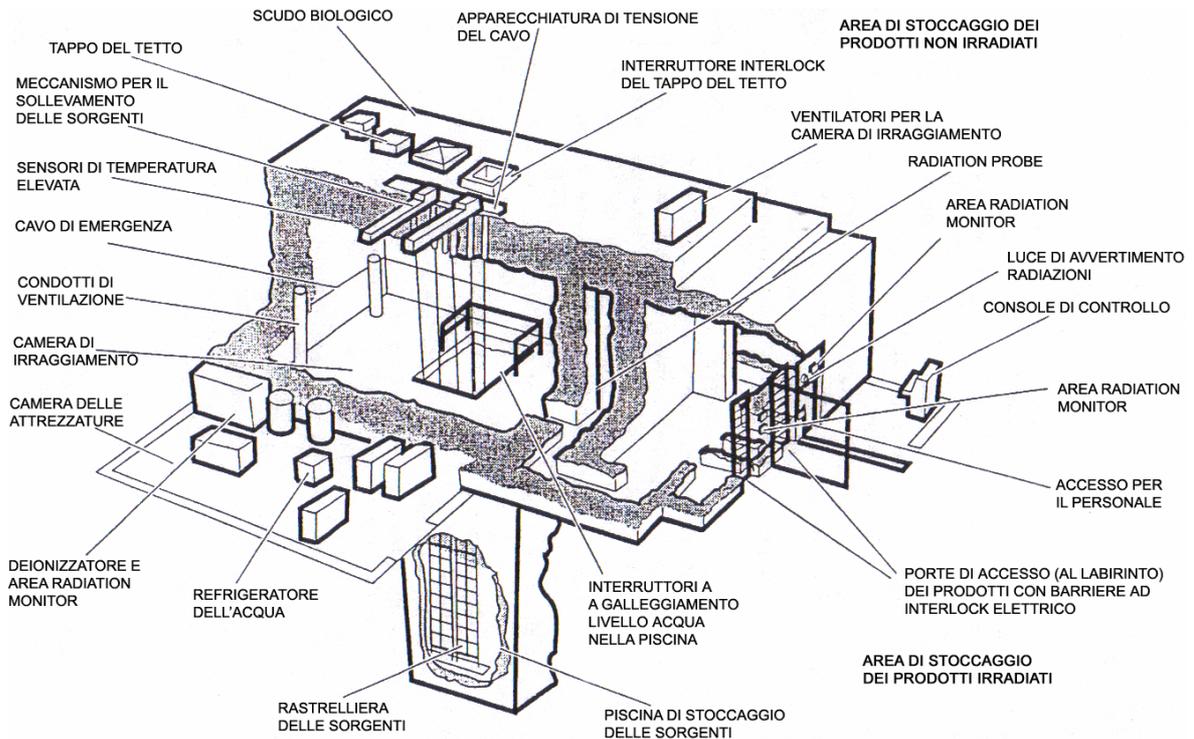


Figura 3. Schema dell'impianto di irraggiamento di concezione moderna considerato.

5.1 Valutazione dell'esposizione potenziale in un impianto di irraggiamento con sorgenti radioattive

Le principali cause che possono comportare l'esposizione a radiazioni di un lavoratore che opera all'interno dell'impianto, possono essere brevemente descritte sulla base dei seguenti scenari incidentali (Figura 4):

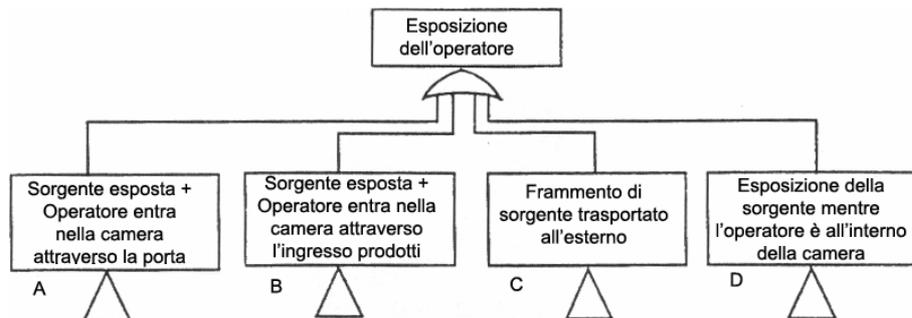


Figura 4. Albero di guasto relativo all'esposizione potenziale nell'irradiatore (Top Event)

- La sorgente è esposta e l'operatore entra nel locale di irraggiamento attraverso l'ingresso per il personale;
- La sorgente è esposta e l'operatore entra nel locale attraverso l'ingresso per i prodotti;
- Un frammento di sorgente è trasportato all'esterno del locale;
- La sorgente viene esposta mentre vi è ancora una persona all'interno del locale.

Tali incidenti possono essere sviluppati secondo gli alberi di guasto mostrati nelle figure 5a ÷ 5d, mentre i dati di probabilità classica utilizzati per le analisi sono riportati in tabella 1.

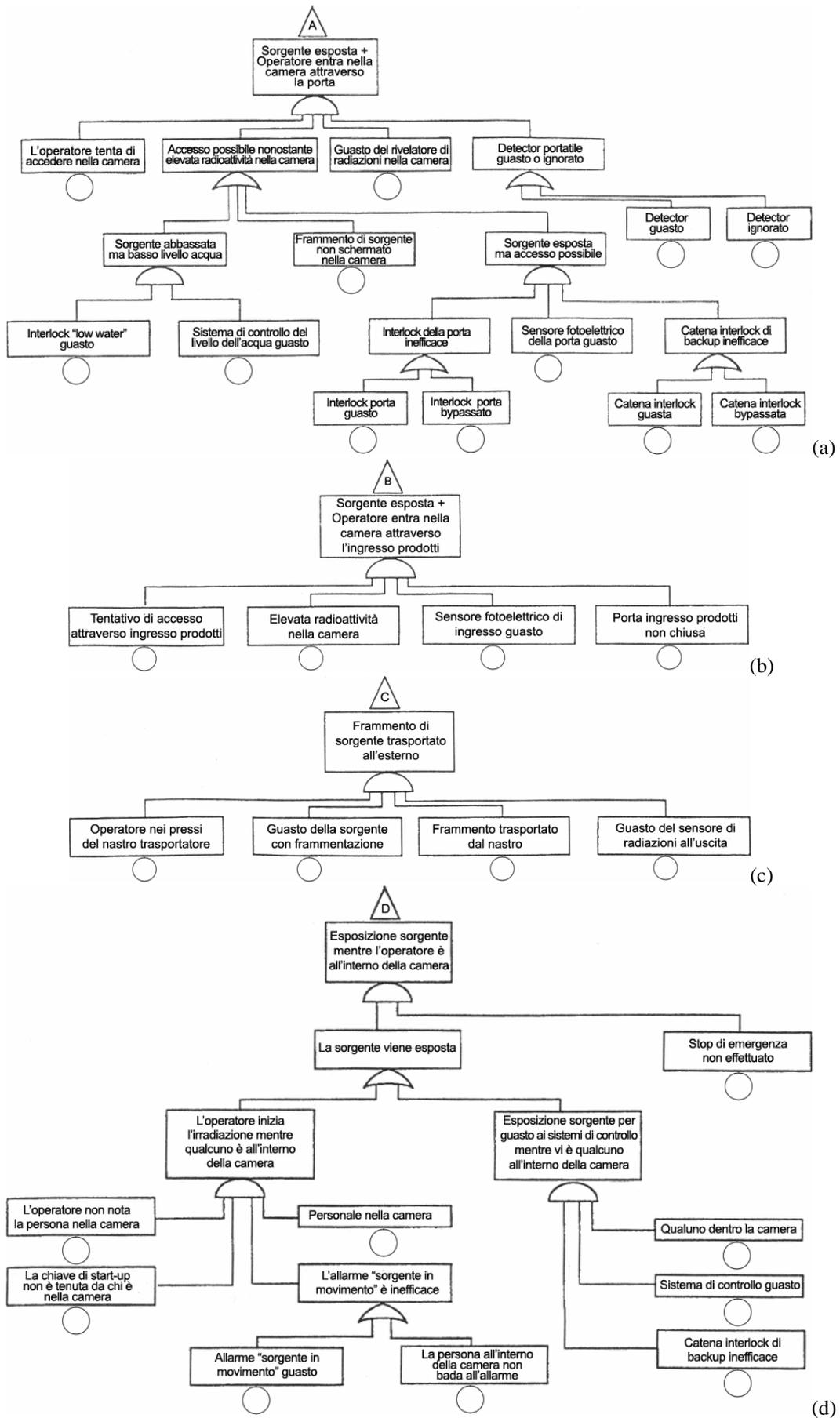


Figura 5 a ÷ d. Albero di guasto relativo all'esposizione potenziale nell'irradiatore.

Tabella 1. Dati di probabilità/frequenze degli eventi primari dell'albero di guasto.

Evento Primario	Dato	Evento Primario	Dato
L'operatore entrare nella camera attraverso la porta	1700 /a	Guasto del "low water" interlock	1×10^{-3} /pd
Guasto rivelatore di radiazioni della camera	1×10^{-3} /pd	Il sistema di controllo livello acqua guasto	1×10^{-4} /h
L'operatore tenta di entrare nella camera attraverso l'ingresso prodotti	1×10^{-2} /a	Guasto dei sensori fotoelettrici della porta	5×10^{-3} /pd
Elevata radioattività nella camera	8×10^{-1} /h	L'operatore non nota una persona all'interno della camera	1×10^{-2} /pd
Guasto dei monitor fotoelettrici	5×10^{-3} /h	La chiave di start-up non è tenuta dalla persona all'interno della camera	6 /a
L'ingresso prodotti non si chiude	1×10^{-4} /pd	Persona all'interno della camera	5×10^{-2} /h
Operatore nei pressi del nastro trasportatore	8×10^{-1} /h	Guasto dei sistemi di controllo	3×10^{-1} /a
Guasto della sorgente con frammentazione	6×10^{-4} /a	La catena di interlock di backup è inefficace	1×10^{-2} /pd
Frammento trasportato dal nastro	2×10^{-1} /pd	Guasto dell'interlock della porta	5×10^{-3} /h
Monitor di radiazioni uscita prodotti guasto	1×10^{-3} /pd	Interlock della porta bypassato	2×10^{-4} /pd
Stop di emergenza non effettuato	1×10^{-2} /pd	Guasto della catena di interlock	5×10^{-3} /h
Guasto del rivelatore portatile	1×10^{-5} /pd	Catena di interlock bypassata	5×10^{-3} /pd
Rivelatore portatile ignorato	1×10^{-2} /pd	Guasto allarme "sorgente in movimento"	1×10^{-4} /pd
Frammento di sorgente non schermato nella camera	4×10^{-7} /h	La persona all'interno della camera non bada all'allarme	1×10^{-2} /pd

Dato che molti degli eventi da prendere in considerazione nell'effettuare l'analisi sono legati al comportamento umano (il quale, come è noto, è fonte di incertezze), ed inoltre altri dati sono affetti da imprecisioni, per l'analisi si è ritenuto utile adottare la logica di tipo sfumato.

Per convertire i dati di probabilità classica in dati di probabilità fuzzy, si è assunto come elemento a membership unitaria dell'insieme fuzzy (p_2) il dato di probabilità classica. Per individuare gli altri due parametri della funzione di appartenenza si è scelto di utilizzare una procedura basata sulla curva di Gauss: assunto il dato classico come valore P_0 di una curva gaussiana, si utilizzano come limite inferiore (p_1) e superiore (p_3) del triangolo fuzzy i valori in corrispondenza, rispettivamente, a $P_0 - P(2\sigma)$ ed a $P_0 + P(2\sigma)$, essendo noto [12] che $P(2\sigma) = 13,53\% P_0$.

Dall'analisi dell'albero effettuata mediante la procedura "porta a porta" si ottiene la seguente distribuzione di probabilità fuzzy per l'esposizione potenziale dell'operatore (naturalmente i dati di probabilità sono stati preventivamente omogeneizzati):

$[1,05 \times 10^{-6}, 1,92 \times 10^{-6}, 3,29 \times 10^{-6}]$ /anno.

Tale probabilità, come già detto, è notevolmente bassa e, comunque, di ordini di grandezza inferiore rispetto a quelle che sono note per gli irradiator di vecchia concezione [1]. Per tali impianti, infatti, tali probabilità si aggirano attorno al valore di $1,6 \times 10^{-3}$ /anno.

Un'analisi di tipo classico condotta sullo stesso caso porta, ovviamente, a risultati identici per quanto riguarda il dato di probabilità, fornendo una probabilità di esposizione potenziale dell'operatore pari a $1,92 \times 10^{-6}$ /anno, ma non fornisce alcuna indicazione circa le incertezze ad esso associate.

La riduzione dell'albero ai suoi insiemi minimi di taglio ha portato ad individuare 17 MCS, dei quali cinque sono di ordine 4, quattro sono di ordine 5, mentre i restanti otto sono di ordine 6.

Ripetendo l'analisi dell'albero, questa volta utilizzando gli insiemi minimi di taglio, si ha la seguente distribuzione di probabilità fuzzy per l'esposizione potenziale dell'operatore:

$[1,05 \times 10^{-6}, 1,92 \times 10^{-6}, 3,29 \times 10^{-6}]$ /anno.

Del tutto prossima a quella determinata mediante la precedente analisi.

Dall'analisi degli indici FIM e FUIM (riportati in tabella 2) si nota come il fattore umano, caratterizzato

dalla distrazione, dall'incuria o dai comportamenti errati dell'operatore sia un elemento che riveste grande importanza negli scenari analizzati.

Tabella 2. Indici FIM e FUIM per gli eventi primari dell'albero di guasto.

Evento Primario	FIM	FUIM	Evento Primario	FIM	FUIM
L'operatore entrare nella camera attraverso la porta	$1,26 \times 10^{-11}$	$2,89 \times 10^{-9}$	Guasto del "low water" interlock	$2,86 \times 10^{-6}$	$3,99 \times 10^{-10}$
Guasto rivelatore di radiazioni della camera	$2,13 \times 10^{-5}$	$2,96 \times 10^{-9}$	Il sistema di controllo livello acqua guasto	$2,86 \times 10^{-5}$	$3,99 \times 10^{-10}$
L'operatore tenta di entrare nella camera attraverso l'ingresso prodotti	$5,88 \times 10^{-7}$	$8,19 \times 10^{-10}$	Guasto dei sensori fotoelettrici della porta	$1,68 \times 10^{-6}$	$1,14 \times 10^{-9}$
Elevata radioattività nella camera	$7,38 \times 10^{-9}$	$7,97 \times 10^{-10}$	L'operatore non nota una persona all'interno della camera	$5,08 \times 10^{-5}$	$7,07 \times 10^{-8}$
Guasto dei monitor fotoelettrici	$1,18 \times 10^{-6}$	$8,01 \times 10^{-10}$	La chiave di start-up non è tenuta dalla persona all'interno della camera	$8,50 \times 10^{-8}$	$6,88 \times 10^{-8}$
L'ingresso prodotti non si chiude	$5,88 \times 10^{-5}$	$8,19 \times 10^{-10}$	Persona all'interno della camera	$1,02 \times 10^{-5}$	$6,91 \times 10^{-8}$
Operatore nei pressi del nastro trasportatore	$1,76 \times 10^{-7}$	$1,90 \times 10^{-8}$	Guasto dei sistemi di controllo	$7,38 \times 10^{-6}$	$3,02 \times 10^{-7}$
Guasto della sorgente con frammentazione	$2,35 \times 10^{-4}$	$1,90 \times 10^{-8}$	La catena di interlock di backup è inefficace	$2,21 \times 10^{-4}$	$3,07 \times 10^{-7}$
Frammento trasportato dal nastro	$7,05 \times 10^{-7}$	$1,90 \times 10^{-8}$	Guasto dell'interlock della porta	$1,62 \times 10^{-6}$	$1,10 \times 10^{-9}$
Monitor di radiazioni uscita prodotti guasto	$1,40 \times 10^{-4}$	$1,95 \times 10^{-8}$	Interlock della porta bypassato	$1,62 \times 10^{-6}$	$4,37 \times 10^{-11}$
Stop di emergenza non effettuato	$2,72 \times 10^{-4}$	$3,78 \times 10^{-7}$	Guasto della catena di interlock	$8,42 \times 10^{-7}$	$5,72 \times 10^{-10}$
Guasto del rivelatore portatile	$2,12 \times 10^{-6}$	$2,96 \times 10^{-12}$	Catena di interlock bypassata	$8,42 \times 10^{-7}$	$5,72 \times 10^{-10}$
Rivelatore portatile ignorato	$2,12 \times 10^{-6}$	$2,96 \times 10^{-9}$	Guasto allarme "sorgente in movimento"	$5,03 \times 10^{-5}$	$7,00 \times 10^{-10}$
Frammento di sorgente non schermato nella camera	$2,51 \times 10^{-2}$	$1,36 \times 10^{-9}$	La persona all'interno della camera non bada all'allarme	$5,03 \times 10^{-5}$	$7,00 \times 10^{-8}$

7. 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 degli operatori che svolgono la loro attività all'interno dei laboratori di un impianto di irraggiamento con sorgente radioattiva.

Per lo scenario incidentale esaminato è necessario prendere in considerazione il fattore umano che, come è noto, è fonte di incertezza. Esso, infatti, dipende fortemente dalla situazione e la quantificazione della sua probabilità implica la conoscenza di una serie di fattori oggettivi, come le condizioni, l'organizzazione del posto di lavoro, ecc..., e soggettivi, come l'addestramento, il livello di distrazione, ecc....

Per tenere in considerazione l'imprecisione connessa ai dati di probabilità relativi al fattore umano, nelle analisi si è fatto ricorso alla metodologia delle probabilità fuzzy.

Non sempre l'uso di questa metodologia è necessario, ma si rivela molto utile quando si abbia che fare con dati affetti da elevate dosi di incertezza, o comunque insufficienti per un'analisi di tipo statistico. Limiti di questa tecnica sono invece le elevate richieste in termini di capacità di calcolo e la mancanza di metodologie standardizzate e comunemente accettate per l'utilizzo della logica fuzzy in analisi di rischio o di affidabilità.

Le analisi in logica fuzzy sono state condotte mediante l'uso del codice TREEZZY2, sviluppato presso il Dipartimento di Ingegneria Nucleare dell'Università degli Studi di Palermo.

Com'era prevedibile, i risultati ottenuti hanno messo in evidenza che l'operatore, e quindi il fattore umano, è un elemento imprescindibile e non trascurabile nella valutazione della probabilità di una esposizione potenziale per la tipologia degli impianti trattati.

7. BIBLIOGRAFIA

- [1] ICRP Publication 76, *Protection from Potential Exposures: Application to Selected Radiation Sources*, Pergamon, November 1996
- [2] V.P. Signorello, “*Studio e messa a punto di un codice a logica sfumata (Fuzzy Logic) per l’analisi di sicurezza ad alberi di guasto in impianti industriali*”, Tesi di Laurea, Dipartimento di Ingegneria Nucleare, Università di Palermo, Anno Accademico 2001/2002.
- [3] F. Castiglia, M. Giardina, V. Signorello, “*TREEZZY*”, un codice per l’analisi di sicurezza ad alberi di guasto di impianti industriali basato su logica fuzzy, Quaderno del Dipartimento di Ingegneria Nucleare dell’Università di Palermo, 9/2002.
- [4] S. Bellini, *Sviluppo ed implementazione del codice TREEZZY2 per l’analisi di sicurezza ad alberi di guasto e ad alberi di eventi con metodologie classiche e sfumate*, Tesi di Laurea, Dipartimento di Ingegneria Nucleare, Università di Palermo, Anno Accademico 2002/2003.
- [5] S. Bellini, M. Casamirra, F. Castiglia, M. Giardina, *TREEZZY2, a Fuzzy Logic Computer Code for Fault Tree and Event Tree Analyses*, PSAM 7 / ESREL '04, Berlin, 14-18 June 2004.
- [6] L.A. Zadeh, *Fuzzy Sets*, Information and control, VIII (1965), pp.338-356.
- [7] R.E. Giachetti, R.E. Young, *A parametric representation of fuzzy numbers and their arithmetic operators*, Fuzzy sets and systems, 91 (1997) 185-202.
- [8] R. Moore, *Interval analysis*, NJ, Prentice-Hall, 1966.
- [9] F. Fabris, *Teoria dell’Informazione, codici, cifrari*. Bollati Boringhieri, 2001.
- [10] P.V. Suresh, A.K. Babar, V. Venkat Raj, *Uncertainty in fault tree analysis: A fuzzy approach*, Fuzzy sets and systems, 83 (1996) 135-141.
- [11] L. Zambolin, M. Carcassi, *Utilizzo della logica fuzzy per l’analisi dell’incertezza associata agli alberi dei guasti*, Congresso nazionale “Valutazione e gestione del rischio negli insediamenti civili ed industriali”, Pisa, Ottobre 2002.
- [12] B. De Finetti, “Teoria della probabilità”, Giulio Einaudi editore.

Ricerca svolta con fondi del Ministero dell’Istruzione, dell’Università e della Ricerca (MIUR): Programmi di Rilevante Interesse Nazionale (PRIN), 2003.