

USO INTEGRATO DI METODOLOGIE FMEA, HAZOP E FAULT TREE NELLA WINDOWLESS TARGET UNIT DI UN ACCELERATOR DRIVEN SYSTEM

V. Amato, F. Castiglia, M. Giardina

Dipartimento di Ingegneria Nucleare, Università degli Studi di Palermo,
Viale delle Scienze-90128 Palermo, castiglia@din.unipa.it

SOMMARIO

Nel presente lavoro si mette in rilievo l'efficacia e la versatilità dell'uso integrato delle tecniche *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA), *HAZard and OPerability study* (HAZOP) e *Fault Tree Analysis* (FTA) [1] attraverso la loro applicazione alla versione Windowless dell'unità Target [2] del reattore XADS (eXperimental Accelerator Driven System) [3] refrigerato mediante lega eutettica Piombo-Bismuto, sviluppato in Italia dall'Ansaldo con la collaborazione di Enti ed Università italiane, fra le quali quella di Palermo.

I risultati ottenuti consentono una articolata previsione di quali siano le più importanti condizioni incidentali del sistema sotto esame che possano generare pericoli e, allo stesso tempo, il riscontro dell'efficacia o meno dei sistemi di protezione predisposti per la prevenzione o, eventualmente, la mitigazione delle sequenze incidentali ipotizzate.

1. INTRODUZIONE

L'esigenza sempre più avvertita dalla società moderna di adeguate risposte in termini di sicurezza degli impianti industriali, ha fatto sì che oggi nessun insediamento produttivo possa essere realizzato senza un'adeguata valutazione dei rischi e dei benefici che esso comporta per i lavoratori, le popolazioni che vivono nelle sue vicinanze e l'ambiente.

L'alto livello di sicurezza richiesto, può essere ottenuto attraverso attenti studi finalizzati all'identificazione, valutazione e gestione dei possibili rischi, attraverso la predeterminazione del loro tipo, frequenza e gravità nonché, attraverso l'adozione di idonei strumenti di prevenzione e mitigazione. Poiché in termini di sicurezza e protezione dell'uomo e dell'ambiente per la gran parte degli impianti industriali ad alto rischio, si richiedono requisiti assai prossimi, qualunque ne sia il tipo, le conoscenze acquisite in campo nucleare rappresentano punti di riferimento importanti per vari altri settori tecnologici.

L'analista deve possedere un'ampia base di conoscenza del sistema da studiare e delle varie metodologie da applicare alle varie fasi dell'analisi di sicurezza del progetto. Una efficace metodologia di analisi, d'altro canto deve poter essere articolata su due livelli: il "cosa" cercare ed il "come" cercare.

Per quanto riguarda il "cosa" cercare è fondamentale, in primo luogo, scomporre la specifica realtà indagata in unità di rischio ben distinte, vale a dire in unità di riferimento potenzialmente in grado di generare eventi sfavorevoli. In tal modo, concentrandosi su unità omogenee e di dimensioni ridotte, si semplificano le attività di analisi, volte all'identificazione degli eventi iniziatori di incidenti e delle relative sequenze incidentali, e si favorisce la razionalizzazione delle informazioni da queste ottenute.

In sintesi, il flusso informativo risultante dal processo di identificazione deve essere strutturato in modo da consentire una descrizione univoca delle unità di pericolo, dei fattori che possono generare, in queste, eventi dannosi, delle tipologie di danno eventualmente generabili e delle loro frequenze di accadimento.

Passando al "come" cercare, sarebbe opportuno utilizzare strumenti di indagine che, integrati da un insieme di cognizioni tecniche di base, permettano di realizzare uno studio conducente ed il più possibile esaustivo. Tra questi strumenti di indagine meritano particolare attenzione le analisi FMEA, HAZOP e FTA.

Come è noto l'FMEA è uno strumento d'indagine che, attraverso l'applicazione di una griglia standard, rivolge la propria attenzione alle modalità di guasto dei singoli componenti e agli effetti di questi sia locali che su tutto il sistema.

L'HAZOP, invece, è un tipo di analisi i cui risultati, presentati in forma tabellare come nell'analisi FMEA, permette una articolata previsione delle possibili evoluzioni future delle singole unità di rischio individuate nel sistema, rivolgendo la propria attenzione essenzialmente ai processi che si verificano in ciascuna di esse.

La FTA ha come caratteristica principale quella di indagare a ritroso un particolare evento, individuando, non solo i rapporti di causa-effetto tra esso ed i fattori che lo hanno determinato, ma anche le possibili relazioni di concatenazione esistenti tra i fattori stessi.

Nel presente lavoro ci si avvale delle tecniche sopra esposte per lo studio di sicurezza della versione Windowless dell'unità Target del prototipo dimostrativo di un reattore di tipo ADS [4] denominato XADS (eXperimental Accelerator Driven System) [3].

A tale scopo, come si vedrà meglio nel seguito, in una prima fase si è proceduto allo sviluppo di una analisi dei modi e degli effetti di guasto (FMEA) per le pompe in esso presenti, ottenendo un'adeguata conoscenza dei tipi di malfunzionamenti e delle conseguenze generate da ciascuno di essi.

Gli elementi di conoscenza acquisiti attraverso la precedente analisi, sono stati utilizzati nell'esecuzione di un'analisi di operabilità (HAZOP) individuando i nodi interni e i nodi di frontiera in cui valutare le possibili deviazioni dei parametri fisici di interesse. In particolare, questo ha consentito di analizzare le fenomenologie più importanti che interessano il suddetto target, in seguito a vari scenari incidentali. In tale tipo di analisi, sono stati individuati dei Top Event, successivamente sviluppati mediante la costruzione dei relativi diagrammi delle sequenze incidentali e valutati con il supporto del codice STARS [7] che consente di effettuare analisi di tipo FT.

2. DESCRIZIONE DELL'UNITA' TARGET STUDIATA

L'impianto dimostrativo XADS attualmente in fase di progettazione concettuale avanzata presso l'Ansaldo Nucleare, è caratterizzato, tra l'altro, dalla presenza di un modulo di spallazione (Target Unit), che consente di collocare al centro geometrico del nocciolo la sorgente dei neutroni di spallazione, generati dalla collisione di protoni, accelerati in un ciclotrone, con un bersaglio (target) costituito da nuclei di eutettico piombo-bismuto fuso.

Nel presente lavoro l'attenzione è stata rivolta essenzialmente all'opzione in cui i protoni raggiungono direttamente il bersaglio (Windowless Target Unit), senza cioè dover attraversare l'interfaccia metallica del tubo guida dei protoni (Proton Beam, P.B.) che in una versione alternativa del modulo di spallazione (Window Target Unit), separa la regione ad alto vuoto del P.B. dal target.

Nel caso considerato, illustrato nella Figura 1, l'eutettico fuso viene fatto scorrere perpendicolarmente al fascio protonico che proviene verticalmente dall'alto nella cosiddetta regione di spallazione, a mezzo di due pompe assiali poste in serie nei due rami verticali del circuito. Cioè, a monte e a valle, del tratto orizzontale esposto al fascio. La parte bassa del circuito è occupata da uno scambiatore a tubi all'esterno dei quali circola l'eutettico caldo proveniente dalla zona di spallazione. All'interno di tali tubi, invece, viene deviata parte del Pb-Bi del circuito primario del reattore, per asportare il calore generato nella spallazione.

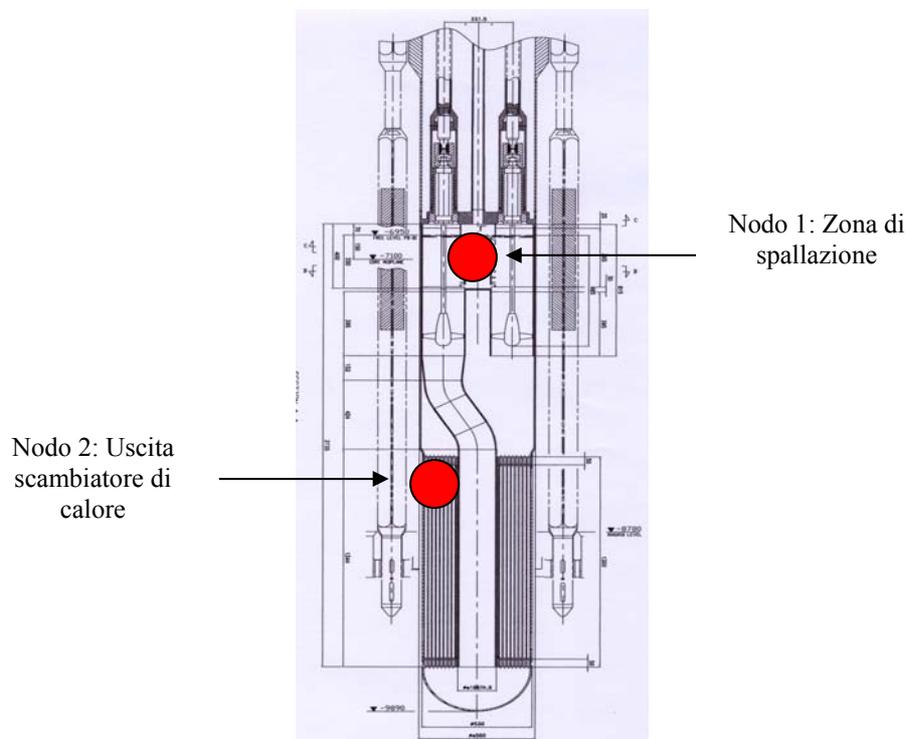


Figura 1. Sezione verticale del target con riferimento nodi di frontiera e nodi interni

La scelta di pompe meccaniche, poste in serie, e la loro disposizione corrisponde esigenze di semplificazione del progetto garantendo, come si vedrà, un adeguato grado di sicurezza.

Le due pompe sono caratterizzate da un lungo albero motore che collega il corpo pompa al rispettivo motore posto in alto nel plenum sotto vuoto e debbono far ricircolare l'eutettico. Esse vengono poste in serie in modo

che ciascuna provveda la metà della prevalenza necessaria e si mantenga, comunque, un adeguato flusso di eutettico anche con una sola pompa in funzione.

Il flusso di eutettico, che attraversa la zona di spallazione dove il fascio collide con i nuclei di esso, deve avere un profilo di velocità tale che si scaldi il meno possibile in superficie, minimizzandone l'evaporazione nella regione del beam pipe che per motivi di resa della reazione di spallazione deve essere mantenuta sotto vuoto. La parte superiore della sezione del target è costituita da eutettico quasi stagnante, che ha lo scopo di eliminare gli ossidi irriducibili trasportati dal flusso ma più leggeri di esso e che galleggiando si accumulano nella zona di calma dalla quale possono essere sottratti.

La zona sotto vuoto, sovrastante la spallazione, è separata da questa mediante l'utilizzo di paratie metalliche che consentono di minimizzare il rilascio dei gas di spallazione e quindi di facilitarne la rimozione [2].

3. ANALISI FMEA

Per motivi di spazio, si effettuerà una analisi FMEA delle sole pompe visto il ruolo fondamentale da esse assunto in questa versione del target.

3.1 Pompa di circolazione

Le pompe considerate hanno il compito di garantire la circolazione del Pb-Bi, elaborando ciascuna una portata variabile tra 10-30 Kg/s.

- 1) Consideriamo per primo il generico *guasto meccanico della pompa* durante il funzionamento, che genera una forte riduzione della portata nel target e, nel contempo, una forte riduzione della sua refrigerazione. Grazie alla operatività della seconda pompa sarà garantito, se pur ridotto, un flusso di refrigerante. Tuttavia sarà comunque necessario, lo spegnimento del proton beam, procedura garantita dal controllo di temperatura presente all'uscita dal core. Grazie alla presenza della seconda pompa, il guasto esaminato può essere classificato nella categoria di severità II.
- 2) Leggermente differente è il caso in cui la pompa funzioni, ma fornisca una *minore portata* rispetto quella nominale. In questo caso la portata si riduce sino ad un certo valore assicurando così una minore refrigerazione del target. Il piccolo incremento di temperatura, generato dal lento riscaldamento, può essere utilizzato per rilevare il guasto. In questo caso, a seconda dell'entità della riduzione della portata, e quindi della refrigerazione, si potrà decidere tra lo spegnimento del proton beam, realizzato automaticamente, o la riduzione della corrente del fascio di protoni. La categoria di severità nella quale si rientra è sempre la II.
- 3) Un ulteriore guasto da prendere in considerazione, di origine esterna alla pompa, è la *perdita di corrente* le cui conseguenze sono le stesse dei casi analizzati prima. E' importante sottolineare che le conseguenze derivanti da questo evento dipendono dalla scelta di progetto di accomunare o separare l'alimentazione del proton beam da quella delle pompe, procedendo in questo caso all'introduzione dei diesel. Nell'ultimo caso non si avrebbe alcuna conseguenza qualora si verificasse la corretta e tempestiva accensione del motore diesel. Per quanto appena detto tale malfunzionamento rientra nella categoria di severità II. Ovviamente nell'eventualità alquanto remota in cui anche i motori diesel non si attivino sarà necessario spegnere il proton beam.
- 4) L'ultimo dei guasti considerati riguarda le *vibrazioni* cui può dare origine la pompa. In questo caso l'evento comporterebbe forti sollecitazioni per l'intero target. Gli interventi dipenderanno allora dall'entità delle vibrazioni, a seconda delle quali si richiede o la riduzione della velocità, con la conseguente necessità di ridurre la corrente del fascio protonico, o lo spegnimento della pompa con relativo spegnimento del proton beam. In entrambi i casi il guasto rientra nella categoria di severità III.

Riassumendo nella classica forma tabellare quanto sinora detto si ottiene la Tabella 1.

4. ANALISI HAZOP

Viste le dimensioni relativamente piccole del sistema in esame si ritiene sufficiente scegliere due nodi di cui uno interno ed uno di frontiera. Il nodo interno è posto proprio in corrispondenza alla zona in cui avvengono le reazioni di spallazione, mentre il nodo di frontiera è posto all'uscita dello scambiatore di calore, lato refrigerante primario (Figura 1). In realtà il primo nodo, ha sia una funzione di nodo interno che di nodo di frontiera. Esso, infatti, consente di studiare sia le deviazioni all'interno del sistema analizzato, il target, che di indagare le deviazioni che dovessero avvenire nelle interazioni con il ciclotrone.

4.1 Deviazioni nel Nodo 1: Zona di spallazione

Vengono studiate, preliminarmente, le deviazioni legate alla corrente del fascio protonico imputabili, per esempio, a compensazioni dovute al “burn-up”:

- *Minore corrente* del fascio protonico che giunge nel target. La causa principale di tale deviazione è imputabile ad un malfunzionamento nel sistema di controllo della corrente. Ovviamente, per effetto della minore corrente protonica, si ha un minore numero di reazioni di spallazione con una conseguente minore potenza depositata nel target. Quest’ultima circostanza si traduce in una minore temperatura dell’eutettico al suo interno. In queste condizioni il reattore, essendo sub-critico, si avvia allo spegnimento.
- *Maggiore corrente* del fascio protonico: può essere studiata in maniera duale rispetto al caso precedente. Anche in questo caso, la causa di tale deviazione va ricercata nell’eventuale guasto del sistema di controllo. Tale deviazione oltre a comportare un aumento della potenza depositata nel target, con conseguente aumento della temperatura dell’eutettico che circola al suo interno produce un aumento della potenza generata nel core (overpower), poiché il nocciolo diventa supercritico. La mitigazione delle possibili evoluzioni derivanti da tale malfunzionamento, è affidata al controllo di temperatura posto all’uscita del core che interviene se si supera il set point (693 K) ed al controllo sul flusso neutronico.
- *Nessuna corrente* del fascio protonico. Tale deviazione può essere dovuta o al corretto spegnimento del P.B. che si verifica in particolari condizioni accidentali oppure ad un suo erroneo spegnimento. In entrambi i casi le conseguenze in termini di sicurezza sono limitate.

Successivamente vengono studiate le deviazioni riguardanti la portata del refrigerante:

- *Minore portata* di refrigerante che circola all’interno del target, le cui cause sono riconducibili a:
 - 1) Guasto ad una delle pompe: questa causa può essere ulteriormente suddivisa in un guasto durante il funzionamento oppure in un “low output”, circostanze già studiate nelle analisi FMEA cui si rimanda per brevità;
 - 2) Malfunzionamento del sistema di controllo della velocità delle pompe: tale controllo è reso necessario a causa delle diverse necessità di refrigerazione del target durante la vita del combustibile (esigenza di introduzione di una reattività via via maggiore, man mano che con il consumo del combustibile la reattività del nocciolo diminuisce). In questo caso si ipotizza un possibile malfunzionamento che generi la riduzione della velocità di entrambe le pompe;
 - 3) Partial flowblockage: quest’ultima causa riguarda la parziale ostruzione che potrebbe crearsi con maggiore probabilità nella stessa zona di spallazione o nella zona dello scambiatore di calore.

In tutti questi casi la conseguenza finale consiste nella riduzione della refrigerazione del target che viene segnalato come Top Event (TOP1).

- *Maggiore portata* di eutettico all’interno del target, che ha come unica causa un malfunzionamento del sistema di controllo sopra menzionato, che genera un incremento della velocità di entrambe le pompe. La conseguenza sarà un incremento della refrigerazione del target anch’esso segnalato come Top Event (TOP2).
- *Nessuna portata* di eutettico nell’unità target. Le cause di questa deviazione sono tutte connesse alla perdita di operatività delle pompe. Si noti che, a causa del posizionamento in basso dello scambiatore di calore, non sarà possibile l’innesco della circolazione naturale. La conseguenza finale è, in questo caso, la totale perdita della refrigerazione del target (TOP3) nei confronti della quale anche in questo caso interviene il controllo di temperatura posto all’uscita del core.

Infine vengono studiate le deviazioni legate alla temperatura del refrigerante che circola nel target:

- *Maggiore temperatura* del refrigerante, le cui cause possono essere:
 - 1) Overpower;
 - 2) Riduzione della portata che circola nel target;
 - 3) Riduzione della capacità di refrigerazione del refrigerante primario che penetra nello scambiatore di calore.

L’ Overpower, come già detto, genera un incremento delle reazioni di spallazione aumentando la potenza depositata nel target e quindi la temperatura del refrigerante al suo interno. La seconda causa è stata già, precedentemente, studiata mentre la terza sarà considerata analizzando il nodo 2. E’ ovvio che le eventuali misure di protezione sono correlate al tipo di evento iniziatore. In ogni caso un ulteriore intervento di mitigazione è garantito dal controllo di temperatura posto all’uscita del core. In funzione dell’entità dell’incremento di temperatura, la conseguenza cui si giunge potrebbe essere un danneggiamento strutturale oltre che un danneggiamento delle pompe individuato come Top Event (TOP4).

- *Minore temperatura* dell’eutettico all’interno del target dovuta a:
 - 1) Aumento della portata che circola nel target;
 - 2) Station blackout;
 - 3) Aumento della capacità di refrigerazione del refrigerante primario che penetra nello scambiatore di calore;

E' presumibile che in nessuno dei tre eventi si possa avere una riduzione della temperatura tale da determinare la solidificazione del Pb-Bi all'interno del target, in considerazione del fatto che quest'ultimo si trova al centro del core in cui, anche a reattore spento, verrebbe prodotta la potenza di decadimento. Molto probabilmente l'effetto che si ottiene è, quindi, un sottoraffreddamento del Pb-Bi già individuato come TOP2.

Riassumendo quanto detto si ottengono le Tabelle 2 e 3.

4.2 Deviazioni nel Nodo 2: Uscita scambiatore di calore

Per questo nodo, le deviazioni che vengono prese in esame sono quelle relative ai parametri fisici del refrigerante che penetra nell'unità target in corrispondenza del primario dello scambiatore di calore:

- *Maggiore temperatura*: questa deviazione ha come effetto la riduzione della refrigerazione del target a causa della riduzione del salto termico esistente tra il Pb-Bi, che vi circola internamente, e il refrigerante primario. Tale conseguenza rappresenta il primo dei Top Event già individuati (TOP1). La protezione contro questa eventualità è garantita dal controllo di temperatura posto all'uscita del core e dagli altri sistemi di protezione presenti nel reattore [5, 6].
- *Minore temperatura*: sono previsti effetti duali rispetto al caso precedente. In questo caso si avrà un aumento della refrigerazione del target, circostanza per la quale è stato segnalato un Top Event (TOP2) che, come già detto, ha scarsa importanza. Anche in questo caso la protezione verrebbe garantita dal controllo di temperatura posto all'uscita del core.
- *Maggiore portata*: visto che la portata di refrigerante primario che fluisce nello scambiatore di calore è una frazione di quella che attraverso il core, le cause di questa deviazione saranno le stesse che generano una maggiore portata nel core. Anche in questo caso la conseguenza principale consiste nell'aumento della refrigerazione del target, già segnalato come Top Event (TOP2). La protezione viene garantita attraverso il sistema di regolazione della portata primaria.
- *Minore portata*: in questo caso, le cause sono le stesse che generano la minore portata nel core oltre che una possibile ostruzione. Le conseguenze sono le stesse di quelle riscontrate a proposito della deviazione *maggiore temperatura* e cioè la riduzione della refrigerazione del target (TOP1). Contro questo evento agiscono sempre il controllo di temperatura del core e il sistema di regolazione della portata primaria.

Quanto detto a proposito del nodo 2 viene riassunto nella Tabella 4.

5. ANALISI FAULT TREE

Nel corso dell'analisi HAZOP, sopra riportata, si sono individuati quattro Top Event:

- 1) Riduzione della refrigerazione del target;
- 2) Aumento della refrigerazione del target;
- 3) Perdita della refrigerazione del target;
- 4) Danneggiamento delle pompe e dell'intera struttura.

Di questi TE si è deciso di sviluppare, a titolo di esempio, solo il primo. E' utile sottolineare che il TOP3 può essere considerato come un sotto-albero, che conduce al TOP1 qui sviluppato. In quest'ultimo non viene specificata l'entità della riduzione considerata, il che permette di analizzare un quadro più ampio della fenomenologia. Passando allora al TE di nostro interesse, si possono individuare due distinte sequenze incidentali in grado di generarlo:

- A) Riduzione della capacità di refrigerazione del refrigerante primario che penetra nello scambiatore di calore;
- B) Riduzione della portata di eutettico all'interno del target.

Con riguardo alla prima sequenza questa può essere a sua volta generata da:

- A1) Aumento della temperatura del refrigerante primario, che viene posto come evento non sviluppato (In realtà, tale evento potrebbe dedursi mediante la costruzione di un sotto-albero che coinvolge eventi incidentali relativi al circuito primario e secondario del reattore, che qui non è possibile trattare per esigenze di brevità [5, 6]);
- A2) Ostruzione di alcuni tubi dello scambiatore di calore lato primario, che genererebbe una riduzione della frazione di portata del refrigerante primario che fluisce nello scambiatore di calore e quindi della refrigerazione dell'eutettico che circola nel target.

Per quel che riguarda la seconda delle sequenze sopra elencate, essa può essere causata da:

- B1) Partial flowblockage, che si riferisce alla parziale ostruzione del circuito che, con maggiore probabilità, può localizzarsi nella zona dello scambiatore di calore oppure nella zona di spallazione;
- B2) Guasto alle pompe, ulteriormente divisibile in:
 - b1) Guasto ad una pompa, che si riferisce al blocco totale della pompa, mentre funziona,

oppure ad una riduzione della portata da quest'ultima erogata (low output);
b2) Guasto ad entrambe le pompe, che si riferisce al blocco o alla riduzione della portata erogata da entrambe le pompe;

Quest'ultimo, a sua volta, può essere causato da:

- b2₁) Malfunzionamento del sistema di controllo delle pompe;
- b2₂) Guasto meccanico ad entrambe le pompe, già visto per la singola pompa nel corso dell'analisi FMEA realizzata nel presente lavoro.

L'albero ottenuto viene riassunto in forma grafica nelle Figure 2-4. Dall'analisi quantitativa di questo albero, eseguita mediante l'uso del codice STARS [7], si ottiene una frequenza di accadimento annua pari a:

$$P(TE) = 2.476 \cdot 10^{-2} \text{ anno}^{-1}$$

Tale frequenza si ritiene non elevata, in vista del fatto che il TE analizzato prescinde dall'entità della riduzione.

Risulta immediato dall'osservazione dell'istogramma degli eventi (Figura 5) che il più critico, ai fini del TE, risulta l'evento (0), cioè l'aumento della temperatura del primario, con un indice d'importanza Barlow-Proschan pari a $7.172 \cdot 10^{-1}$ ed una frequenza di accadimento annua di $1.776 \cdot 10^{-2}$.

Tramite le analisi svolte sono, inoltre, stati individuati dieci minimal cut set. Dallo studio risulta che solo i minimal cut set di primo ordine contribuiscono a generare il TE.

6. CONCLUSIONI

Lo studio effettuato sulla presente versione del target proposta per l'impianto LBE-XADS induce, almeno in via preliminare, alla seguente considerazione: nonostante le caratteristiche di sicurezza complessiva dell'impianto siano da attribuirsi anche all'assenza di organi in movimento, l'introduzione di pompe meccaniche per la circolazione di eutettico nell'unità, risulta compatibile con gli standard richiesti.

7. BIBLIOGRAFIA

- [1] Center for chemical process safety of the American Institute of Chemical Engineers. *Guidelines for Hazard Evaluation Procedures*, Second Edition with worked example;
- [2] G. Corsini, L. Barucca, L. Mansani. *Specifica di prova, Prove idrauliche di circolazione del target in configurazione widowless*, Technical Report, Ansaldo Nucleare, TRASCO 14 SREX 0003;
- [3] L. Barucca, L. Mansani. *Identification and categorization of Design Basis Accidents and Acceptance Criteria*. Technical Report, Ansaldo Nucleare, ADS 1 TRIX 0249;
- [4] F. Carminati, R. Klapisch, J.P. Revol, Ch. Roche, J.A. Rubio and C. Rubbia, An Energy Amplifier for cleaner and inexhaustible nuclear energy production driven by a particle beam accelerator, European Organization for Nuclear Research, CERN/AI/93-47 (ET), Geneva, 1 Novembre 1993;
- [5] S. Aliotta, V. Amato, F. Castiglia, M. Giardina, *Studi di sicurezza mediante tecniche integrate Hazop-Alberi di guasto-Analisi delle conseguenze su un impianto nucleare innovativo di tipo ADS*, Quaderno 1/2003 del Dipartimento di Ingegneria Nucleare, Palermo, Aprile 2003;
- [6] V. Amato, F. Castiglia, M. Giardina, *Analisi FMEA dell'impianto nucleare innovativo XADS (eXperimental Accelerator Driven System)*, Quaderno 6/2003 del Dipartimento di Ingegneria Nucleare, Palermo, Luglio 2003;
- [7] STARS Study User Guide, 1990-1995, Microsoft Corp
- [8] EIREDA (*European Industry Reliability Data Handbook*), *Industrial Plants*, Vol. 2-2nd edition Société Française d'Etudes et Réalisations 1995;
- [9] OREDA (*Offshore Reliability Data Handbook*) 1st edition, Published by Oreda Participans 1984;

Modalità di guasto	Fase operativa	Effetti locali	Effetti sull'unità	Metodi di rilevazione	Misure di mitigazione	Osservazioni	Tasso di guasto Λ (h ⁻¹)	Severità	Frequenza
Generico guasto meccanico con blocco	10-30 Kg/s	Forte riduzione di portata nel target	Riduzione della refrigerazione del target	Aumento della temperatura del refrigerante che circola nel target	Spegnimento del P.B.	Non si ha la perdita totale della portata grazie alla presenza della seconda pompa.	$1.9 \cdot 10^{-7}$ [8]	II	III
Bassa Portata	10-30 Kg/s	Riduzione della portata nel target	Lenta riduzione della refrigerazione del target	Lento riscaldamento del refrigerante che circola nel target	Ridurre la potenza o spegnere il P.B.	Non si ha la perdita totale della portata grazie alla presenza della seconda pompa.	$1.79 \cdot 10^{-6}$ [9]	II	II
Perdita di corrente	10-30 Kg/s	Forte riduzione di portata nel target	Riduzione della refrigerazione del target	Aumento della temperatura del target	Spegnimento del P.B.	Necessaria la presenza di motori diesel	10^{-6}	II	II
Vibrazioni	10-30 Kg/s	Difficoltà a mantenere la portata al valore nominale	Sollecitazioni sull'intero target		Ridurre la velocità o spegnere le pompe	Come conseguenza degli interventi bisogna rispettivamente ridurre la corrente del P.B. oppure spegnerlo.	$1.5 \cdot 10^{-7}$	III	III

Tabella 1. Analisi FMEA della pompe di circolazione

Deviazione	Parametro	Cause	Conseguenze	Protezioni	Commenti	TOP
Minore di	Corrente del fascio protonico	Malfunzionamento nel sistema di controllo del ciclotrone	Minore potenza depositata nel target	Intervento da parte dell'operatore	La minore potenza depositata comporta un raffreddamento dell'eutettico all'interno del target.	
Maggiore di	Corrente del fascio protonico	Malfunzionamento nel sistema di controllo del ciclotrone	Maggiore potenza depositata nel target	Controllo di temperatura del core e controllo del flusso neutronico	In questo caso si ha un incidente di overpower con conseguente incremento della temperatura dell'eutettico all'interno del target oltre che all'interno del core.	
Nessuna di	Corrente del fascio protonico	Malfunzionamento nel sistema di controllo del ciclotrone	Nessuna potenza depositata nel target		L'assenza di corrente del fascio protonico comporta solamente una interazione di produzione	
Minore di	Temperatura	Aumento della portata nel target	Raffreddamento del target	Controllo di temperatura del core	Anche con <i>proton beam</i> spento non è presumibile che il Pb-Bi si solidifichi nel target termico.	TOP2
		Aumento della refrigerazione del refrigerante che penetra nello scambiatore di calore				
		Station blackout				
Maggiore di	Temperatura	OVERPOWER	Possibile danneggiamento delle pompe e/o dell'intera struttura	Controllo di temperatura del core	In tutti e tre i casi l'immediato intervento può essere garantito dal controllo di temperatura del core.	TOP4
		Riduzione della portata del target				
		Riduzione della refrigerazione del refrigerante che penetra nello scambiatore di calore				

Tabella 2. Analisi HAZOP; Nodo 1 Zona di spallazione.

Deviazione	Parametro	Cause	Conseguenze	Protezioni	Commenti	TOP
Nessuna di	Portata	Guasto ad entrambe le pompe (guasto al sistema di controllo, guasto meccanico)	Perdita della refrigerazione del target	Controllo di temperatura del core	La contemporanea perdita di entrambe le pompe genera la totale perdita della refrigerazione del target.	TOP3
Maggiore di	Portata	Malfunzionamento del sistema di controllo delle pompe	Aumento della refrigerazione del target		La presenza di un sistema di controllo è necessario perché la corrente del P.B. varia durante la vita del combustibile	TOP2
Minore di	Portata	Guasto ad una delle pompe (si guasta mentre funziona, low output)	Riduzione della refrigerazione del target	Controllo di temperatura del core	Nel caso di guasto ad entrambe le pompe si avrebbe la totale perdita della portata	TOP1
		Malfunzionamento del sistema di controllo delle pompe			Si considera un malfunzionamento in entrambe le pompe	

Tabella 3. Analisi HAZOP; Nodo 1 Zona di spallazione.

Deviazione	Parametro	Cause	Conseguenze	Protezioni	Commenti	TOP
Maggiore di	Temperatura	Maggiore temperatura del refrigerante primario	Riduzione della refrigerazione del target	Controllo di temperatura del core	La maggiore temperatura del refrigerante primario all'ingresso dello scambiatore di calore comporta un minore scambio termico.	TOP1
Minore di	Temperatura	Minore temperatura del refrigerante primario	Aumento della refrigerazione del target	Controllo di temperatura del core	Anche con P.B. spento non è credibile che il Pb-Bi si solidifichi nel target.	TOP2
Minore di	Portata	Le stesse che determinano una minore portata nel core	Riduzione della refrigerazione del target	Controllo di temperatura del core	Le cause che determinano una minore portata nel core non vengono trattate nel corso del presente lavoro. Anche nel target potrebbe richiedersi la presenza di un controllo di temperatura.	TOP1
		Ostruzione di alcuni tubi dello scambiatore				
Maggiore di	Portata	Le stesse che determinano una maggiore portata nel core	Aumento della refrigerazione del target	Sistema di regolazione della portata del refrigerante primario	L'aumento della refrigerazione del target non provoca rilevanti problemi	TOP2

Tabella 4. Analisi HAZOP; Nodo 2 Uscita scambiatore di calore.

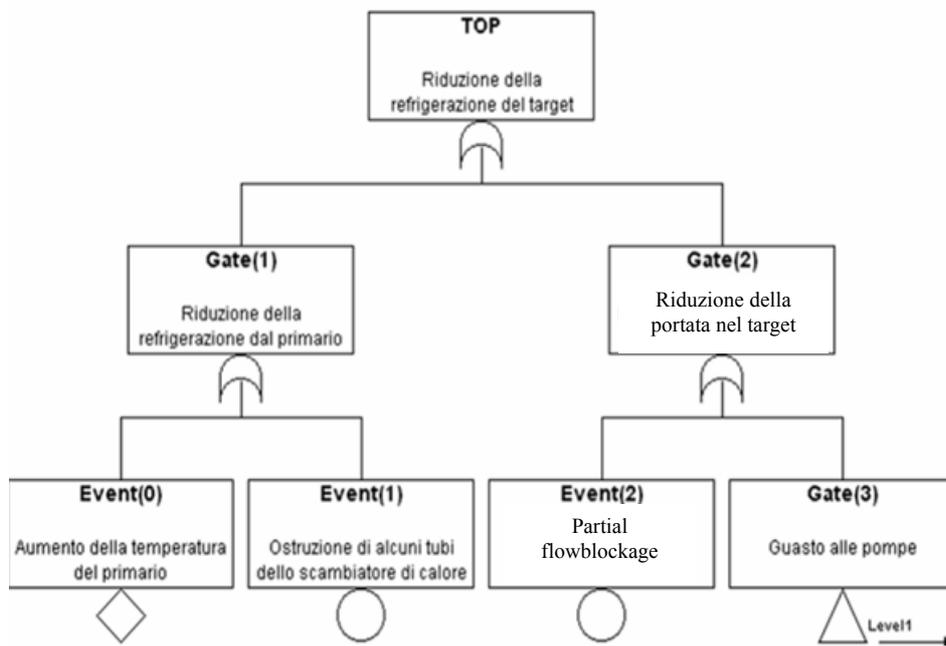


Figura 2. Albero di guasto “Riduzione della refrigerazione del target”

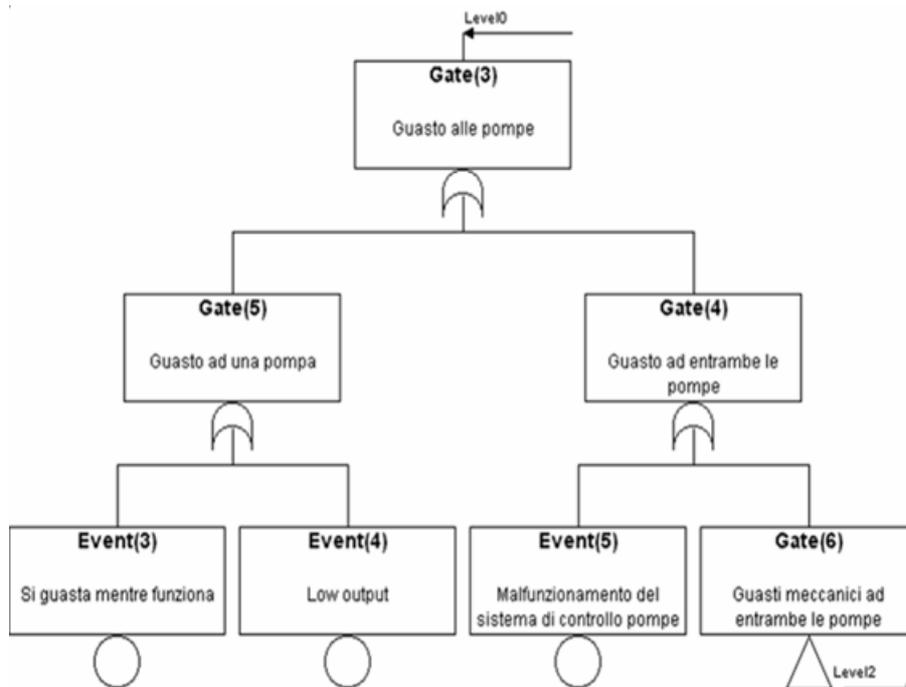


Figura 3. Sotto-albero relativo al “Guasto alle pompe”

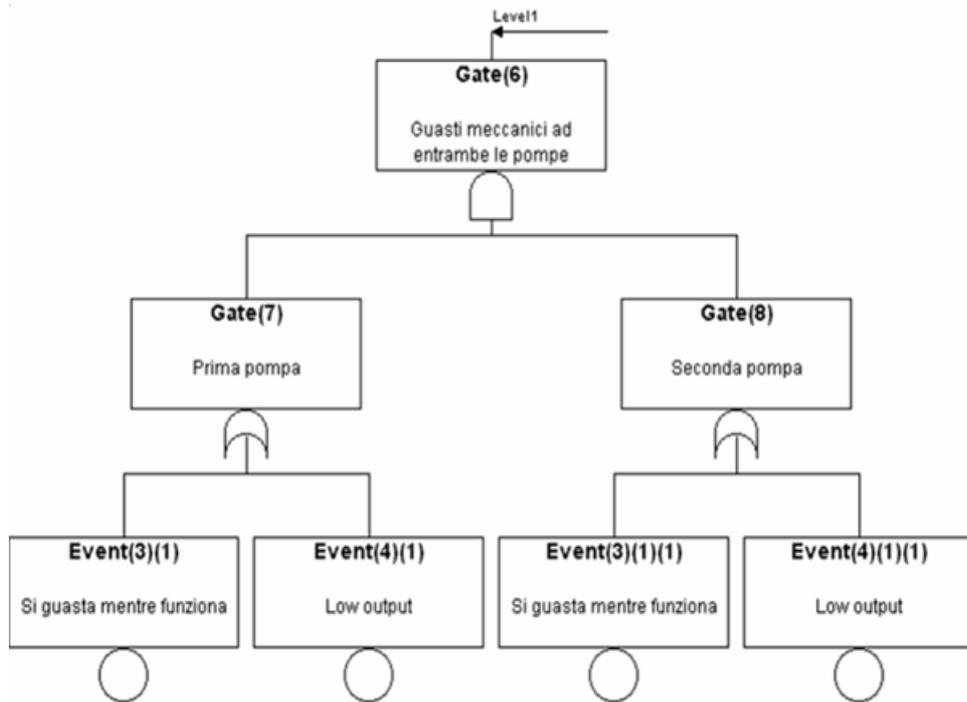


Figura 4: Sotto-albero relativo ai “Guasti meccanici ad entrambe le pompe”

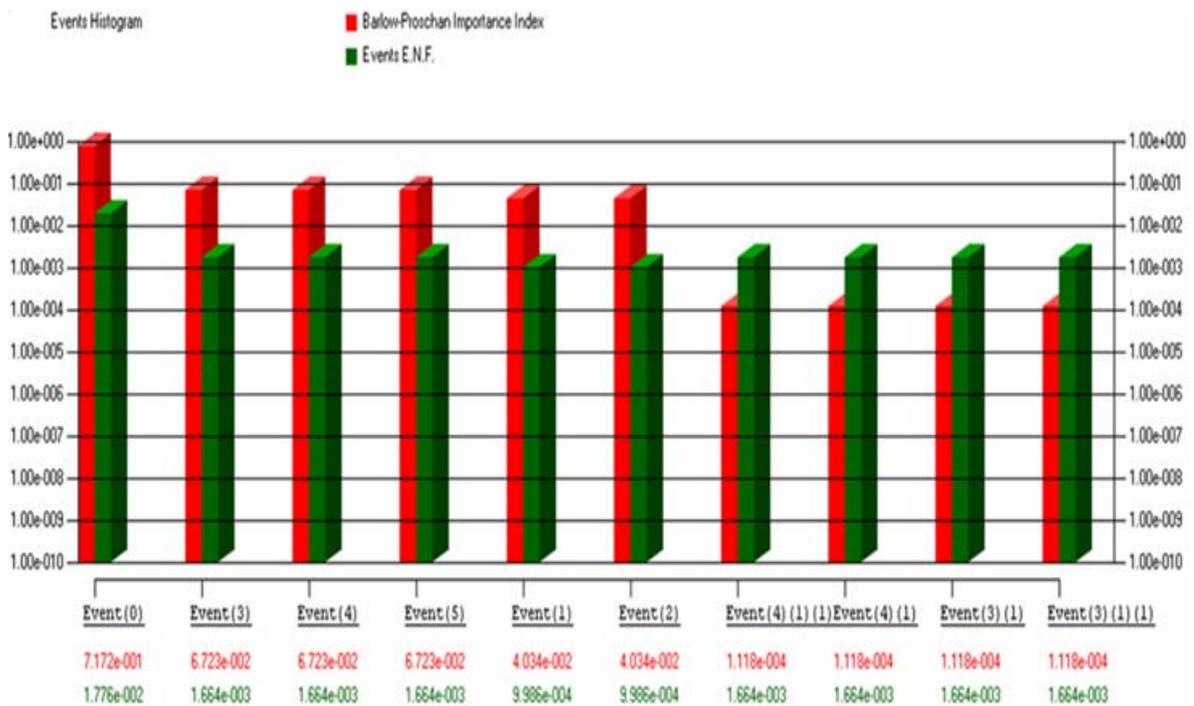


Figura 5: Istogramma degli eventi

Lavoro realizzato tramite fondi del Ministero dell’Istruzione, dell’Università e della Ricerca (MIUR);
Fondi: Progetti di Rilevante Interesse Nazionale (PRIN), anno 2002.