

# Metodi di Analisi dei Sistemi



SAPIENZA  
UNIVERSITÀ DI ROMA

Lorenzo Fedele  
Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Aerospaziale

# Argomenti

Metodi di analisi di affidabilità

- ✓ FMEA/FMECA
- ✓ HAZOP
- ✓ FTA/ETA

# **FMEA - FMECA**

**FMEA**

**Failure Mode Effect Analysis**

**FMECA**

**Failure Mode Effect Criticality Analysis**

# Introduzione

L'analisi dei modi e degli effetti di guasto (**FMEA**) e l'analisi dei modi e degli effetti di guasto e della loro criticità (**FMECA**) sono **metodi di analisi di affidabilità** che permettono di identificare i guasti che hanno conseguenze importanti sulle prestazioni di un sistema nell'ambito di una data applicazione.

# Introduzione

- L'esecuzione di un'analisi di criticità serve per ***quantificare la criticità*** di un effetto di guasto e ***stimare la probabilità*** del verificarsi del relativo modo di guasto.
- Quantificare la criticità e la probabilità di un guasto permette di scegliere le ***azioni correttive*** da effettuare, la loro ***priorità*** e di stabilire la demarcazione tra una ***criticità accettabile ed una inaccettabile***.

# FMEA

La metodologia FMEA trova applicazione in tre casi principali:

- *Nuovi progetti, nuove tecnologie, nuovi processi*
- *Modifiche a progetti o processi esistenti*
- *Impiego di un progetto o processo esistente in un nuovo ambiente, contesto operativo o applicazione*

# FMEA

## DFMEA (Design FMEA) – FMEA di progettazione

La FMEA di Progettazione è una tecnica utilizzata generalmente dai responsabili della progettazione (uffici tecnici, di sviluppo nuovi prodotti, di ingegnerizzazione della produzione).

Nasce con il prodotto e si evolve con esso, ne segue lo sviluppo; in pratica si tratta di prevedere già durante la fase di progettazione e sviluppo quali potranno essere i problemi potenziali di produzione e legarli alle presunte cause che li generano.

La FMEA di Progettazione dovrebbe focalizzare la propria attenzione su:

- Disegno del modello, delle forme (stampi), degli strumenti, scelta dei materiali necessari per la produzione
- Limitare, ove possibile, le finiture superficiali
- Rendere il più agevole possibile il montaggio delle parti componenti
- Ottimizzare la Process-Capability (capacità di processo) e la performance del processo produttivo
- Ove previsto disegnare opportuni lay-out impiantistici per ottimizzare il flusso della produzione e ridurre il WIP (Work In Progress)

# FMEA

## PFMEA (Process FMEA) – FMEA di processo

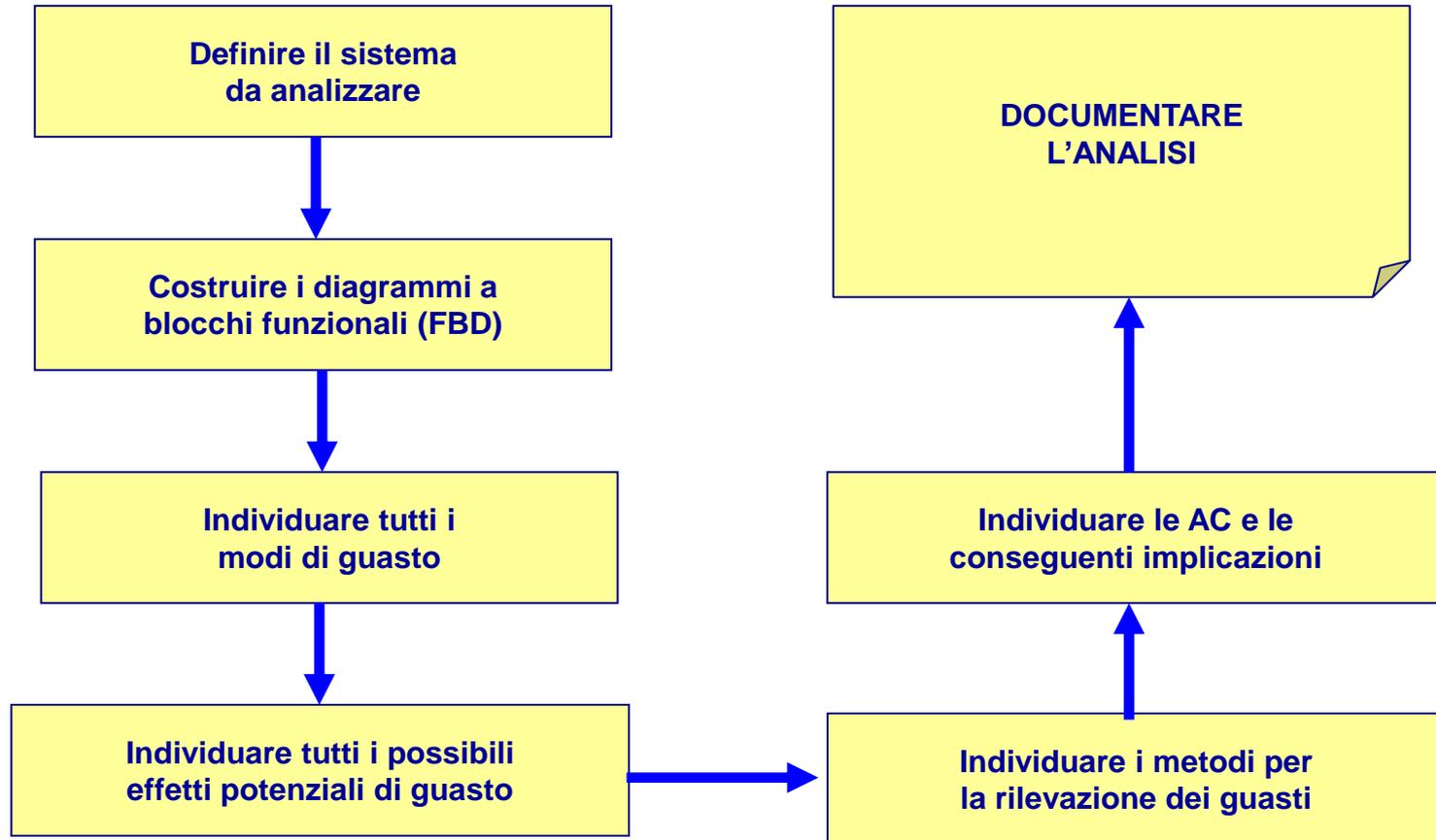
La FMEA di processo è una tecnica analitica utilizzata da un responsabile di processo o da un gruppo come mezzo per individuare i problemi potenziali e legarli alle possibili cause.

L'inserimento delle cause potenziali deve essere il più preciso possibile solo così può essere uno strumento importante nella soluzione dei problemi (effetti).

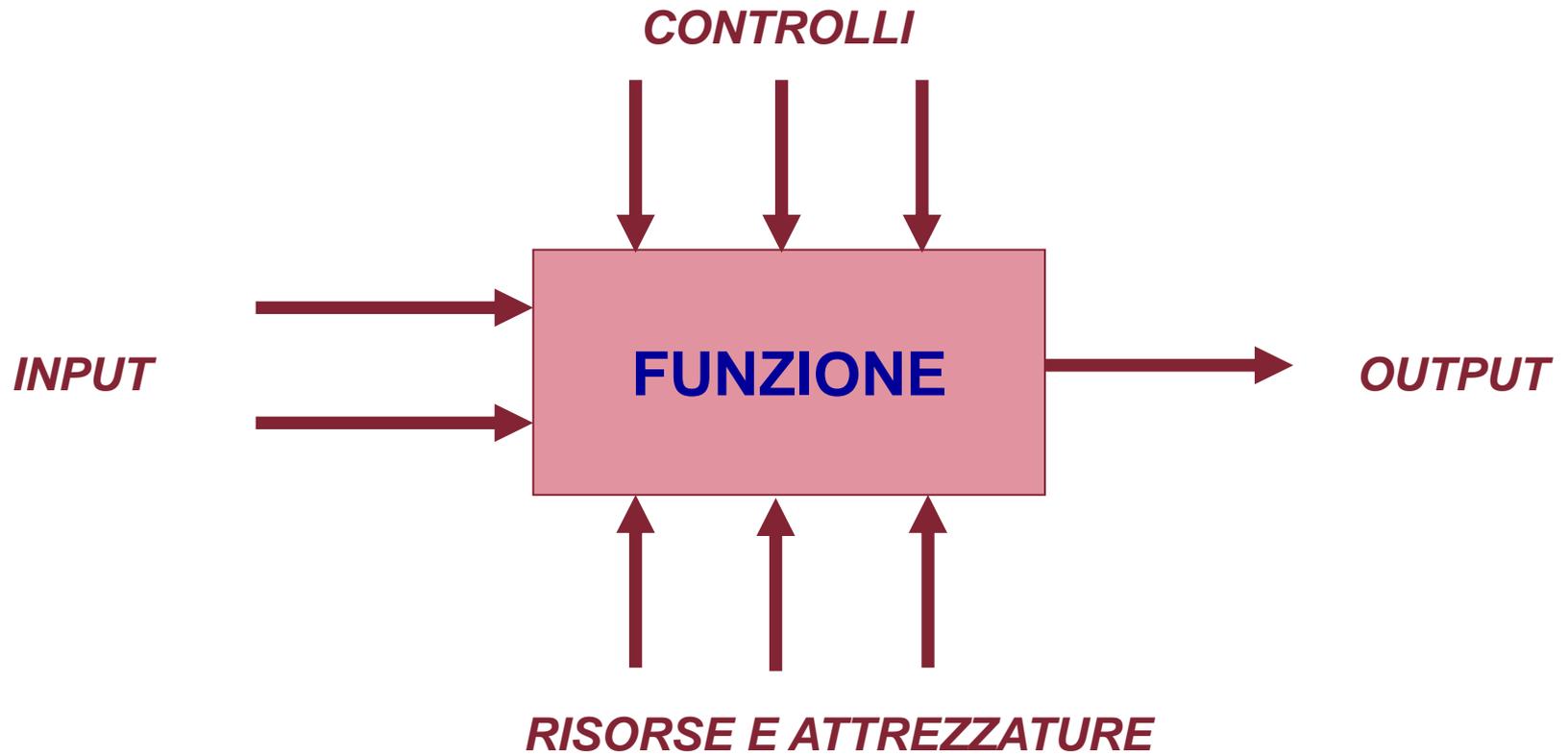
La FMEA di processo dovrebbe:

- Identificare i potenziali prodotti legati ai problemi nei processi (guasti, anomalie, difetti)
- Individuare i possibili effetti sul cliente.
- Identificare i processi di produzione o assemblaggio e le variabili di processo che possono concorrere alla creazione del problema (effetto) in esame.
- Predisporre un controllo più efficace per individuare o ridurre le condizioni che provocano l'anomalia.
- Realizzare una lista di potenziali problemi e stabilire una priorità di intervento.
- Documentare il risultato del processo di produzione o assemblaggio.

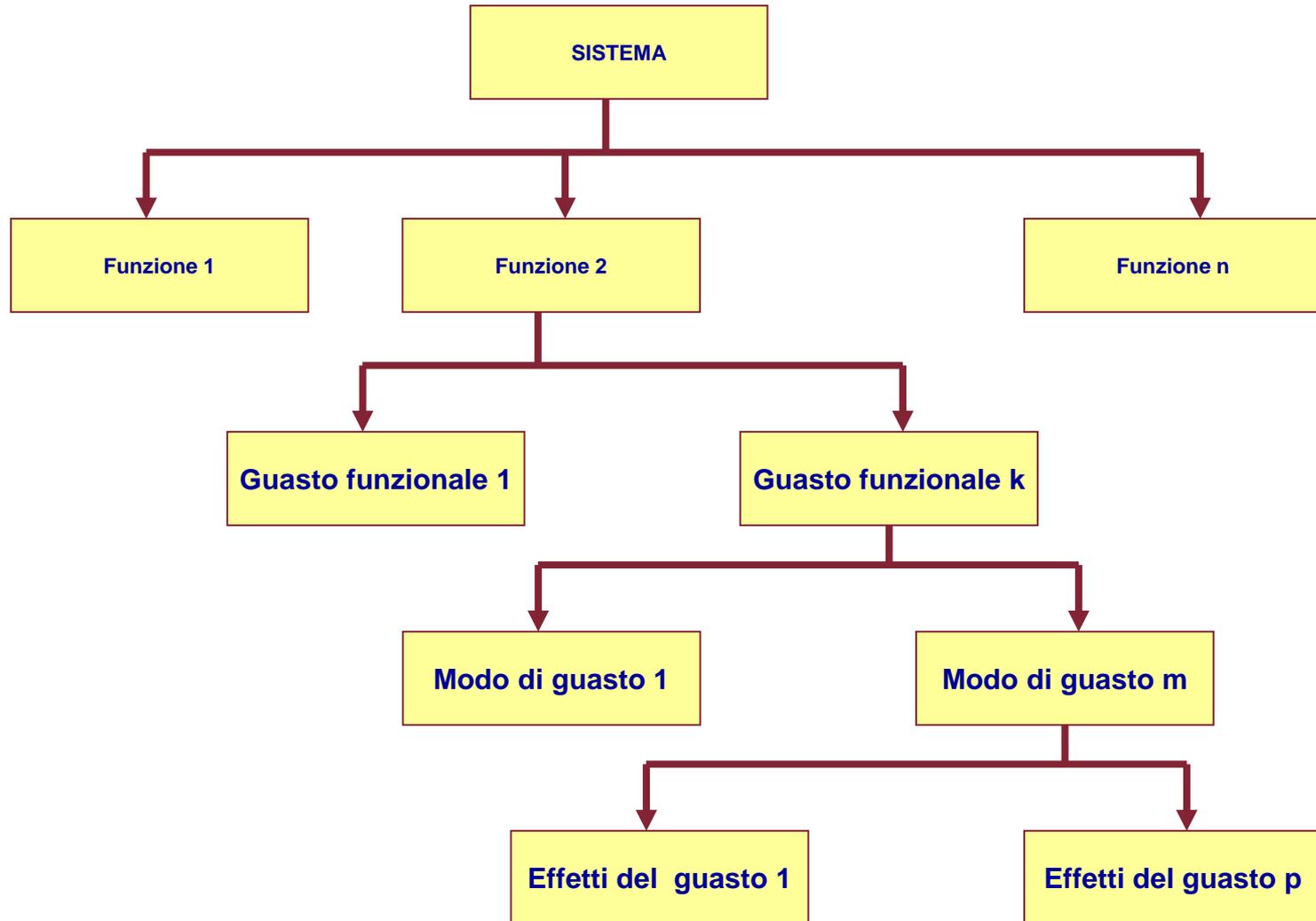
# Diagramma di flusso - FMEA



# FBD Elementare



# Arborescenza della FMEA

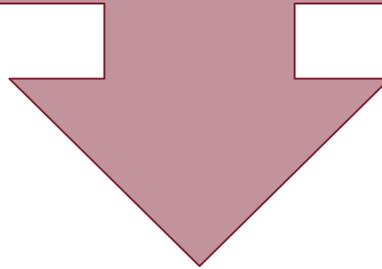


# Il problema della FMEA

Dare le risposte giuste per gli esperti è facile

Ma è fare le domande giuste, che è difficile

Ma come si fa a formulare le “domande giuste” per ottenere le “risposte giuste”?



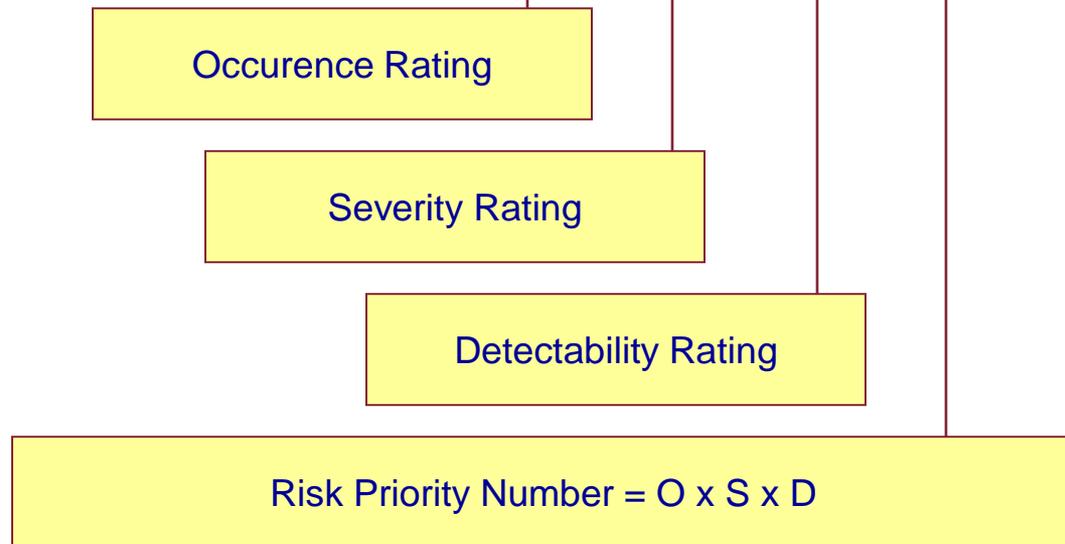
**Si fanno agli esperti tutte le domande possibili**

# FMECA

L'analisi FMECA è una evoluzione della FMEA a cui è aggiunta, in cascata, una procedura di tipo pseudo-quantitativo di ***Criticality Analysis***.

# FMECA

Componente	Modo di guasto	Effetto del guasto	Causa del guasto	Presenza segnale preventivo	Guasto: Nascosto Evidente	MTBF	<b>O</b>	<b>S</b>	<b>D</b>	<b>RPN</b>	AC Maintenance option



# FMECA – RPN

RPN (Risk Priority Number) = Occurrence  $\times$  Severity  $\times$  Detectability

[Criticità = Probabilità  $\times$  Gravità  $\times$  Difficoltà di Individuazione = **PGI**]

	1 punto	10 punti
Occurrence	<i>Raro</i>	<i>Frequente</i>
Severity	<i>Trascurabile</i>	<i>Morte</i>
Detectability	<i>Facile</i>	<i>Difficile</i>

# FMECA – Modi di guasto

Possibili **modi di guasto**. Elenco proposto CEI 56-1 (CEI EN IEC 60812):

1. Guasto alla struttura	18. Attivazione errata
2. Grippaggio o inceppamento	19. Non si ferma
3. Vibrazioni	20. Non si avvia
4. Non resta in posizione	21. Non commuta
5. Non apre	22. Intervento prematuro
6. Non chiude	23. Intervento in ritardo
7. Rimane aperto	24. Ingresso errato (eccessivo)
8. Rimane chiuso	25. Ingresso errato (insufficiente)
9. Perdita verso l'interno	26. Uscita errata (insufficiente)
10. Perdita verso l'esterno	27. Uscita errata (eccessiva)
11. Fuori tolleranza (in più)	28. Mancanza di ingresso
12. Fuori tolleranza (in meno)	29. Mancanza di uscita
13. Funziona anche quando non dovrebbe	30. Corto circuito (elettrico)
14. Funzionamento intermittente	31. Circuito aperto (elettrico)
15. Funzionamento irregolare	32. Dispersione (elettrica)
16. Indicazione errata	33. Altre condizioni di guasto eccezionali a seconda delle caratteristiche del sistema, le condizioni di funzionamento ed i vincoli operativi
17. Flusso ridotto	

# FMECA – Analisi di criticità

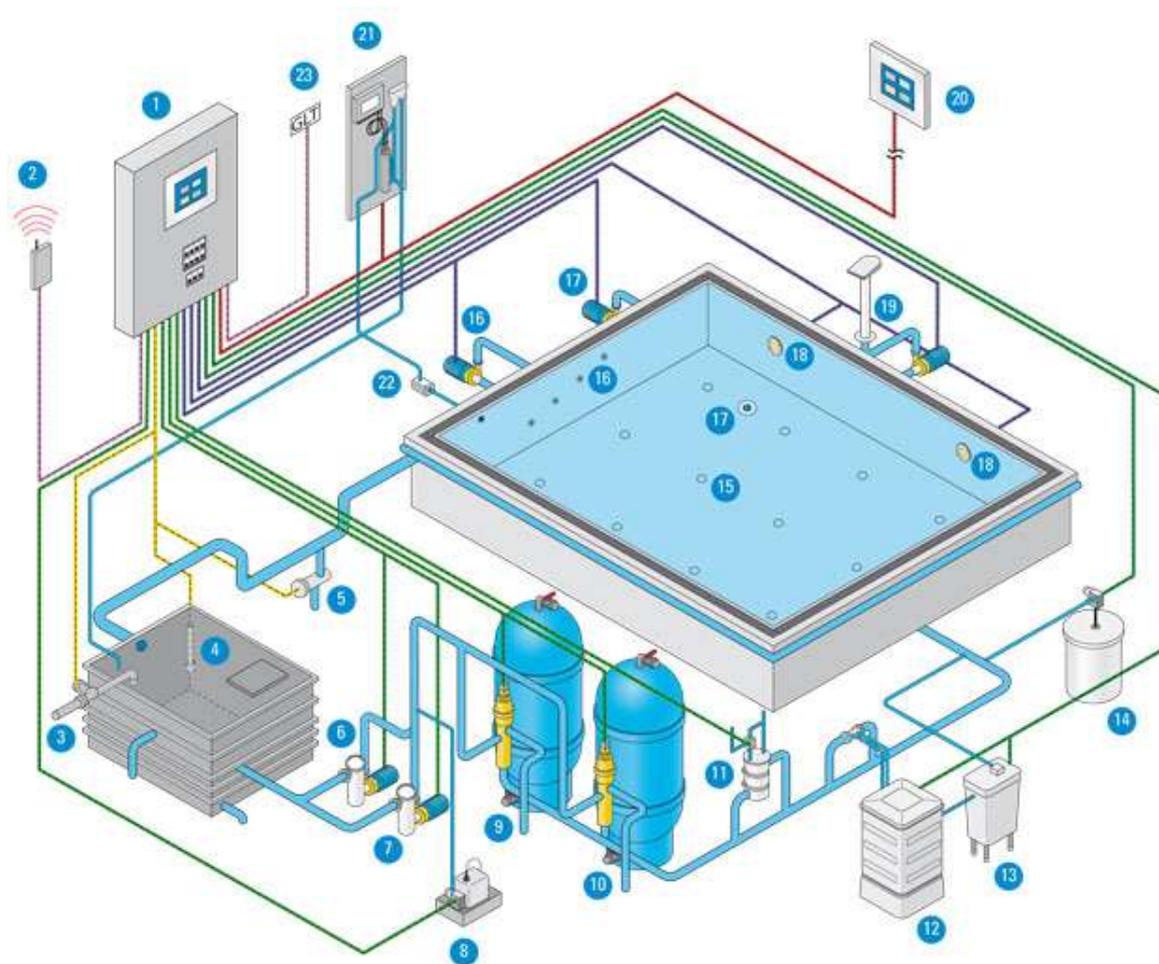
Criticità - Tabella proposta dalla norma CEI 56-1 (CEI EN IEC 60812)

<b>Livello di criticità</b>	<b>Condizioni che definiscono la criticità</b>
I	Ogni evento suscettibile di nuocere al buon funzionamento del sistema,causando danni trascurabili al sistema o dell'ambiente circostante senza presentare rischi di morti o menomazioni.
II	Ogni evento che nuoce al buon funzionamento di un sistema senza tuttavia causare danni notevoli al sistema né presentare rischi importanti di morti o menomazioni.
III	Ogni evento che potrebbe causare la perdita di funzioni essenziali del sistema provocando danni importanti al sistema o al suo ambiente, ma con un rischio trascurabile di morti o menomazioni.
IV	Ogni evento che potrebbe causare la perdita di funzioni essenziali del sistema provocando danni importanti al sistema o al suo ambiente e/o che potrebbe causare morti o menomazioni.

# FMECA – Griglia delle criticità

<b>IV</b>				
<b>III</b>				
<b>II</b>				
<b>I</b>				
	<b>MOLTO PICCOLA</b>	<b>PICCOLA</b>	<b>MEDIA</b>	<b>ALTA</b>

# FMECA – Esempio



1. Quadro elettrico
2. Modem GSM
3. Afflusso acqua di riempimento
4. Vasca di compenso con elettrodi di livello
5. Valvola idraulica per pulizia sfioro
6. Pompa di ricircolo 1
7. Pompa di ricircolo 2
8. Impianto di dosaggio per flocculante
9. Impianto di filtrazione 1
10. Impianto di filtrazione 2
11. Scambiatore di calore
12. Apparecchio per la clorazione dell'acqua (clorozono®)
13. Impianto di dosaggio per aumento del pH
14. Impianto di dosaggio per diminuzione del pH
15. Bocchette di immissione
16. Idromassaggio subacqueo
17. impianti per effetti sul fondo
18. Fari subacquei
19. Doccione
20. Telecomando BlueControl®
21. Punto di rilevamento
22. Collegamento al sistema di controllo dell'edificio

Fonte: <http://www.eltab.com/>

<b>Descrizione del componente</b>		<b>Descrizione del guasto</b>			<b>Effetti del guasto</b>		<b>Gravità</b>	<b>Probabilità</b>	<b>Difficoltà di individuazione</b>	<b>RPN</b>
<b>Componente</b>	<b>Funzione</b>	<b>Modo di guasto</b>	<b>Causa</b>	<b>Individuazione</b>	<b>Agli altri componenti</b>	<b>Alla funzione principale</b>				
Serbatoio impianto di dosaggio per aumento del PH (13)	Correzione del PH	Guasto nel sistema di misurazione	Deterioramento	Ispezione o manutenzione	Piscina senza il corretto valore di PH	Cattiva qualità dell'acqua	4	6	8	192
Pompa impianto di dosaggio per aumento del PH (13)	Circolazione dei fluidi per aumento PH	Guasto della pompa	Bloccaggio Mancanza di alimentazione	Ispezione visiva Lamentele degli utenti	Piscina senza il corretto valore di PH	Cattiva qualità dell'acqua	4	3	2	24
Serbatoio impianto di dosaggio per diminuzione del PH (14)	Correzione del PH	Guasto nel sistema di misurazione	Deterioramento	Ispezione o manutenzione	Piscina senza il corretto valore di PH	Cattiva qualità dell'acqua	4	6	8	192
Pompa impianto di dosaggio per diminuzione del PH (14)	Circolazione dei fluidi per aumento PH	Guasto della pompa	Bloccaggio Mancanza di alimentazione	Ispezione visiva Lamentele degli utenti	Piscina senza il corretto valore di PH	Cattiva qualità dell'acqua	4	3	2	24
Impianto di filtrazione 1 (9)	Filtraggio dell'acqua	Intasamento del filtro	Deterioramento	Ispezione visiva Lamentele degli utenti	Piscina senza filtraggio (induce maggiori dosi di cloro)	Cattiva qualità dell'acqua	4	5	2	40
Impianto di filtrazione 2 (10)	Filtraggio dell'acqua	Intasamento del filtro	Deterioramento	Ispezione visiva Lamentele degli utenti	Piscina senza filtraggio (induce maggiori dosi di cloro)	Cattiva qualità dell'acqua	4	5	2	40
Serbatoio apparecchio per la clorazione dell'acqua (12)	Disinfezione	Guasto nel sistema di misurazione	Deterioramento	Lamentele degli utenti	Piscina non disinfettata	Qualità dell'acqua non garantita (possibili eczemi e eruzioni cutanee)	10	6	4	240
Pompa di ricircolo 1 (6)	Pompaggio acqua	Guasto della pompa	Bloccaggio Mancanza di alimentazione	Ispezione visiva	Piscina senza circolazione di acqua	Qualità dell'acqua non garantita	4	3	8	96
Pompa di ricircolo 2 (7)	Pompaggio acqua	Guasto della pompa	Bloccaggio Mancanza di alimentazione	Ispezione visiva	Piscina senza circolazione di acqua	Qualità dell'acqua non garantita	4	3	8	96

# FMECA – Esempio

## Parametri per la quantificazione della valutazione

P	Probabilità di accadimento delle conseguenze delle anomalie, formulata sulla base di un giudizio professionale in relazione al sopralluogo effettuato	1	bassa	evento improbabile; nessun accadimento ( $P < 0,001$ )
		2		evento improbabile; nessun accadimento ( $P < 0,001$ )
		3		evento remoto; improbabile ma possibile ( $0,001 < P < 0,01$ )
		4		evento remoto; improbabile ma possibile ( $0,001 < P < 0,01$ )
		5	media	evento occasionale; accadimenti limitati ( $0,01 < P < 0,1$ )
		6		evento occasionale; accadimenti limitati ( $0,01 < P < 0,1$ )
		7		evento probabile; accadimenti ripetuti ( $0,1 < P < 0,2$ )
		8		evento probabile; accadimenti ripetuti ( $0,1 < P < 0,2$ )
		9		evento frequente; accadimenti frequenti ( $> 0,2$ )
		10	alta	evento frequente; accadimenti frequenti ( $> 0,2$ )

M	Gravità delle conseguenze delle anomalie, formulata sulla base di un giudizio professionale in relazione al sopralluogo effettuato	1	trascurabile	nessun infortunio, nessun danno al sistema, nessuna percezione da parte del cliente
		2		nessun infortunio, nessun danno al sistema, nessuna percezione da parte del cliente
		3		nessun infortunio, nessun danno al sistema, nessuna percezione da parte del cliente
		4	marginale	infortunio lieve, danno marginale al sistema, percezione marginale da parte del cliente
		5		infortunio lieve, danno marginale al sistema, percezione marginale da parte del cliente
		6	critico	infortunio grave, danno grave al sistema, percezione grave da parte del cliente
		7		infortunio grave, danno grave al sistema, percezione grave da parte del cliente
		8	catastrofico	morte, perdita del sistema, perdita del cliente
		9		morte, perdita del sistema, perdita del cliente
		10		morte, perdita del sistema, perdita del cliente

D	Possibilità che l'anomalia non venga rilevata prima che la conseguenza di essa pervenga alle fasi successive, ovvero, all'utente	1		l'anomalia può essere rilevata in ogni momento, facilmente (a vista)
		2		
		3		
		4		bisogna effettuare una ricerca semplice per rilevare l'anomalia
		5		
		6		bisogna effettuare una ricerca specifica e mirata (audit) per rilevare l'anomalia
		7		
		8		
		9		l'anomalia non viene rilevata prima che l'output del processo pervenga all'utente
		10		

Norme cogenti	DLgs 626/94 - Attuazione delle direttive 89/391/CEE, 89/654/CEE, 89/655/CEE, 89/656/CEE, 90/269/CEE, 90/270/CEE, 90/394/CEE, 90/679/CEE, 93/88/CEE, 97/42/CE e 1999/36/CE riguardanti il miglioramento della sicurezza e della salute dei lavoratori durante il lavoro
Norme tecniche	DPR 162/99 - Regolamento recante norme per l'attuazione della direttiva 95/16/CE sugli ascensori e di semplificazione dei procedimenti per la concessione del nulla osta per ascensori e montacarichi, nonché della relativa licenza di esercizio UNI CEI EN 45011:1999 - Requisiti generali relativi agli organismi che gestiscono sistemi di certificazione di prodotti UNI CEI EN ISO/IEC 17020:2005 - Criteri generali per il funzionamento dei vari tipi di organismi che effettuano attività di ispezione UNI EN ISO 19011:2003 - Linee guida per gli audit dei sistemi di gestione per la qualità e/o di gestione ambientale MIL-STD 1629 (IEC 812:1985, CEI EN 60812 e CEI 56-1:1988)

# FMECA – Esempio

Analisi delle anomalie, delle conseguenze e delle criticità associate

Processo	Operazioni	Fasi	Processi direzionali							
			Fattori	Anomalie	Conseguenze	P	M	D	RPN	
Direzione	Amministrazione		1.sono garantite una stabilità finanziaria e risorse adeguate per il funzionamento del sistema	-	-	-	-	-	-	-
			2.sono state prese tutte le precauzioni affinché l'organismo sia libero, compreso il direttore responsabile ed il personale, da ogni pressione di carattere commerciale, finanziaria o di altra natura che possa influenzare i risultati del processo di verifiche periodiche	1.il direttore tecnico non è a conoscenza, né ha la consapevolezza di doverne preoccupare, circa eventuali altre attività svolte da collaboratori dell'ente notificato, tecnici e non. Ciò risulta particolarmente grave per collaboratori operanti presso sedi distaccate (ad esempio, Sig. Lizza a Napoli). L'uso di tali sedi, peraltro, che pure sono presentate al pubblico come sedi dell'ente notificato, non è formalizzato, né proceduralizzato. Il direttore tecnico, infatti, non conosce tali sedi, né direttamente, né indirettamente, e non si è mai preoccupato di sorvegliarne l'operato come risulterà chiaro meglio più avanti.	A.Verificatori non indipendenti nel giudizio da pressioni economiche Verificatori non tecnicamente adeguati	7,5	7	9	472,5	
			3.l'organismo, o l'organizzazione di cui fa parte, ha una contabilità verificata da revisori indipendenti	-	-	-	-	-	-	-
			4.l'organismo è indipendente nella misura richiesta dalle condizioni in cui svolge la propria attività	-	-	-	-	-	-	-
			5.ta direzione dell'organismo, avente la responsabilità per la qualità, ha definito e documentato la propria politica per la qualità, inclusi gli obiettivi e gli impegni per la qualità?	2.Esiste un manuale qualità emesso revisionato nel 2004. Il documento di politica è inserito all'interno del manuale qualità. Tale politica non è aggiornata, non è diffusa e il relativo documento non è distribuito. La politica per la qualità contiene errori, in quanto fa riferimento all'attività di certificazione nel settore dei materiali da costruzione e non degli ascensori. La politica della qualità non è aderente alle esigenze di qualità di un ente notificato.	B.Scarsa motivazione dei verificatori nei riguardi di una loro effettiva crescita professionale Comportamento non sistematico e non omogeneo dei verificatori C.Servizi non omogenei ai committenti	10	7	5	350	
			6.l'organismo partecipa allo scambio di esperienze con altri organismi e, quando appropriato, ad attività di normazione	-	-	-	-	-	-	-
			8.l'organismo partecipa allo scambio di esperienze con altri organismi e, quando appropriato, ad attività di normazione	-	-	-	-	-	-	-
			3.il Direttore tecnico svolge un ruolo prevalentemente gestionale, affidandosi in larga misura ad un supporto consulenziale tecnico (Ing. Piancaldini) con il quale peraltro non esiste un contratto formale (tale figura è però prevista in organigramma).	B. Coordinamento, supervisione e controllo delle risorse tecniche non omogeneo e sistematico. Formazione continua non assicurata.	7,5	8	9,5	570		
RPNm(Ammministrazione)										
<b>421</b>										
RPNm (Direzione generale)										
-										
RPNm (Direzione tecnica)										
<b>560</b>										
RPNm (Direzione)										
<b>490</b>										
Processo	Operazioni	Fasi	Fattori	Anomalie	Conseguenze	P	M	I	RPN	
		Informazioni alla clientela	1.l'organismo fornisce ai richiedenti una descrizione aggiornata e dettagliata delle procedure di valutazione e di verifica	-	-	-	-	-	-	

# FMECA – Esempio

Processo	Operazione	Processi caratteristici	
		Fase	Fattori
Verifica periodica	Domanda	Ricezione e attivazione	<p>Il richiedente di certificazione chiede la compilazione di un modulo di domanda ufficiale, firmato da un rappresentante di chi presenta domanda opportunamente autorizzato, nel quale è allegato al quale sia riportato quanto segue:</p> <p>a) il tipo di verifica richiesta?</p> <p>b) una dichiarazione del richiedente la cui accettazione comporta il rispetto di tutti i requisiti dell'organismo e di fornire ogni informazione necessaria per la verifica periodica?</p> <p>c) il richiedente deve fornire almeno le informazioni seguenti:</p> <p>a) le sue generalità, come ragione sociale, nome, indirizzo e stato giuridico dell'azienda;</p> <p>b) una descrizione dei prodotti da verificare e le norme applicabili per ciascuno di essi, se conosciute da chi presenta domanda.</p>
		Analisi della domanda	<p>Il prima di procedere alla valutazione, l'organismo esamina le domande e ne consente la registrazione in modo da garantire che:</p> <p>a) i requisiti per l'attività di verifica siano chiaramente definiti, documentati e compresi?</p> <p>b) ogni divergenza di interpretazione tra l'organismo e il richiedente sia risolta?</p> <p>c) l'organismo abbia la capacità di svolgere l'attività di verifica in relazione alle tipologie di impianti, alla sede del richiedente e ad ogni requisito particolare?</p>
	Aggiornamento dello scadenzario	<p>11. l'organismo prepara un piano per le attività di valutazione al fine di assicurare che vengano adottati i necessari provvedimenti.</p> <p>12. l'organismo esegue in proprio le ispezioni che ha accettato contrattualmente di effettuare.</p>	
	Verifica periodica	Planificazione	<p>13. se l'organismo di ispezione assegna qualche parte dell'ispezione ad un subfornitore, assicura ed è in grado di dimostrare che il subfornitore è competente per fornire il servizio in questione e, qualora applicabile, soddisfa i criteri indicati nella norma opposta della serie en 43000.</p>

## Classificazione delle tipologie di conseguenze

Codice conseguenza	Descrizione delle tipologie di conseguenze
A	<p>Conseguenze in grado di ridurre in modo significativo la sicurezza dell'impianto:</p> <p>a) la verifica periodica non è eseguita in modo corretto su componenti critici per la sicurezza, oppure</p> <p>b) la verifica periodica non è gestita correttamente nelle sue fasi essenziali alla chiara definizione della commessa (rispetto delle scadenze, riesame del contratto, incarico agli ispettori, etc.)</p>
B	<p>Conseguenze in grado di ridurre la sicurezza dell'impianto:</p> <p>a) la verifica periodica non è eseguita in modo del tutto corretto, ma gli aspetti essenziali per la sicurezza sono tenuti in conto</p> <p>b) la verifica periodica non è gestita in modo del tutto sistematico (mancanza di procedure scritte, mancato rispetto di talune procedure, cattive prassi, etc.)</p>
C	<p>Conseguenze sulla qualità del servizio erogato e sulla soddisfazione del cliente</p>

**HAZOP**

**HAZOP**

**HAZard and OPerability analysis**

# Introduzione

L'HAZOP (*Hazard and Operability Analysis*) è un'analisi di **tipo qualitativo** che consente di evidenziare come un sistema potrebbe non corrispondere al comportamento previsto in fase progettuale.

## Introduzione

- **HAZARD**: qualsiasi situazione che possa causare un rilascio catastrofico di sostanze chimiche tossiche, infiammabili o esplosive o qualunque evento che possa produrre il ferimento del personale
- **OPERABILITY**: qualsiasi situazione che possa produrre uno spegnimento dell'impianto con una conseguente violazione delle condizioni di rispetto ambientale, di sicurezza e di salute degli operatori e che possa infine avere ripercussioni negative sulla profittabilità

# HAZOP

La metodologia si basa sul *lavoro di una squadra di esperti* con diversa formazione scientifico-culturale e viene svolta in una serie di incontri seguendo una struttura prestabilita, dettata dall'esperienza del *team leader* e dalle *parole guida*.

# HAZOP

Il processo ha **carattere sistematico** ed è strutturato attraverso una **terminologia** ben precisa:

- **Nodi:** sono i punti (delle tubazioni, delle strumentazioni o delle procedure) in cui vengono analizzate le deviazioni dei parametri
- **Intenzione:** definisce come deve operare l'impianto nelle intenzioni del progettista
- **Deviazione:** è l'allontanamento dall'intenzione
- **Cause:** sono le ragioni che inducono le deviazioni

# HAZOP

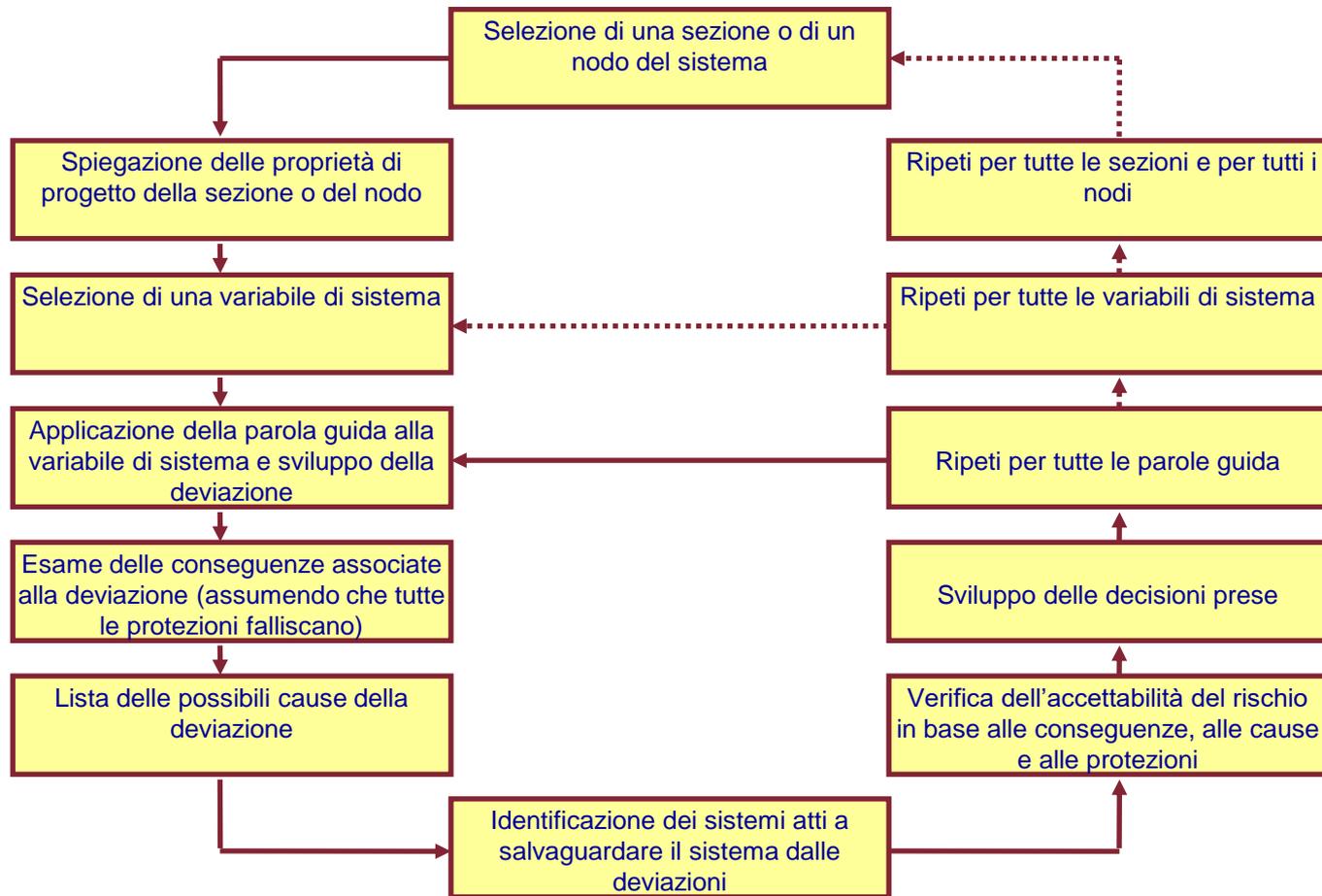
- **Conseguenze:** sono gli eventi che possono accadere a causa delle deviazioni
- **Parole guida:** sono delle semplici parole che vengono utilizzate **per qualificare o quantificare un'intenzione**, esse sono usate al fine di evidenziare la situazione in modo efficace e di stimolare il processo per scoprire le deviazioni. Spesso è necessario adattare le parole guida ai parametri in esame

# HAZOP – Modalità di applicazione

Lo svolgimento dell'analisi HAZOP può essere diviso in ***cinque fasi***:

1. definizione dello scopo e degli obiettivi dello studio
2. selezione del team
3. preparazione dello studio
4. esecuzione dell'analisi
5. registrazione dei risultati

# HAZOP – Diagramma di flusso



## HAZOP – Esecuzione dell'analisi

- ❑ Nell'analisi preliminare l'impianto viene suddiviso attraverso una *serie di nodi*
- ❑ L'analisi HAZOP viene svolta applicando le *parole guida* ai parametri che caratterizzano i nodi; le parole guida devono essere applicate una ad una, a tutti i parametri, per ogni nodo
- ❑ La scelta della *successione dei nodi* viene effettuata seguendo il flusso del processo
- ❑ La *combinazione parola guida-parametro* identifica la deviazione, che può essere reale o meno; se non è reale si procede oltre, se invece è reale si passa all'indagine delle cause che possono provocarla e delle conseguenze che può comportare

# HAZOP – Uso delle parole guida

In genere negli impianti industriali viene utilizzato un gruppo di parole guida ristretto che è costituito dalle **seguenti espressioni**:

- ✓ **no**: negazione dell'intenzione, non si realizza né l'intenzione né altro
- ✓ **maggiore**: incremento quantitativo
- ✓ **minore**: decremento quantitativo
- ✓ **anche**: incremento quantitativo, non solo si realizza l'intenzione ma ulteriori condizioni favorevoli
- ✓ **parte di**: decremento qualitativo, solo una parte dell'intenzione viene raggiunta
- ✓ **inverso**: si realizza il contrario logico dell'intenzione
- ✓ **diverso**: non si realizza l'intenzione, neanche in parte, ma accade qualcosa di abbastanza diverso

## HAZOP – Uso delle parole guida

Quando è importante considerare anche il ***parametro temporale***, sono necessarie ulteriori parole guida, che in genere sono:

- ✓ **presto:** qualcosa accade anticipatamente rispetto alla sequenza prevista
- ✓ **tardi:** qualcosa accade in ritardo rispetto alla sequenza prevista
- ✓ **prima:** qualcosa accade prima di quando fosse previsto
- ✓ **dopo:** qualcosa accade dopo di quando fosse previsto

# HAZOP – Uso delle parole guida

**Parola chiave + Parametro/Funzione = Deviazione Potenziale**

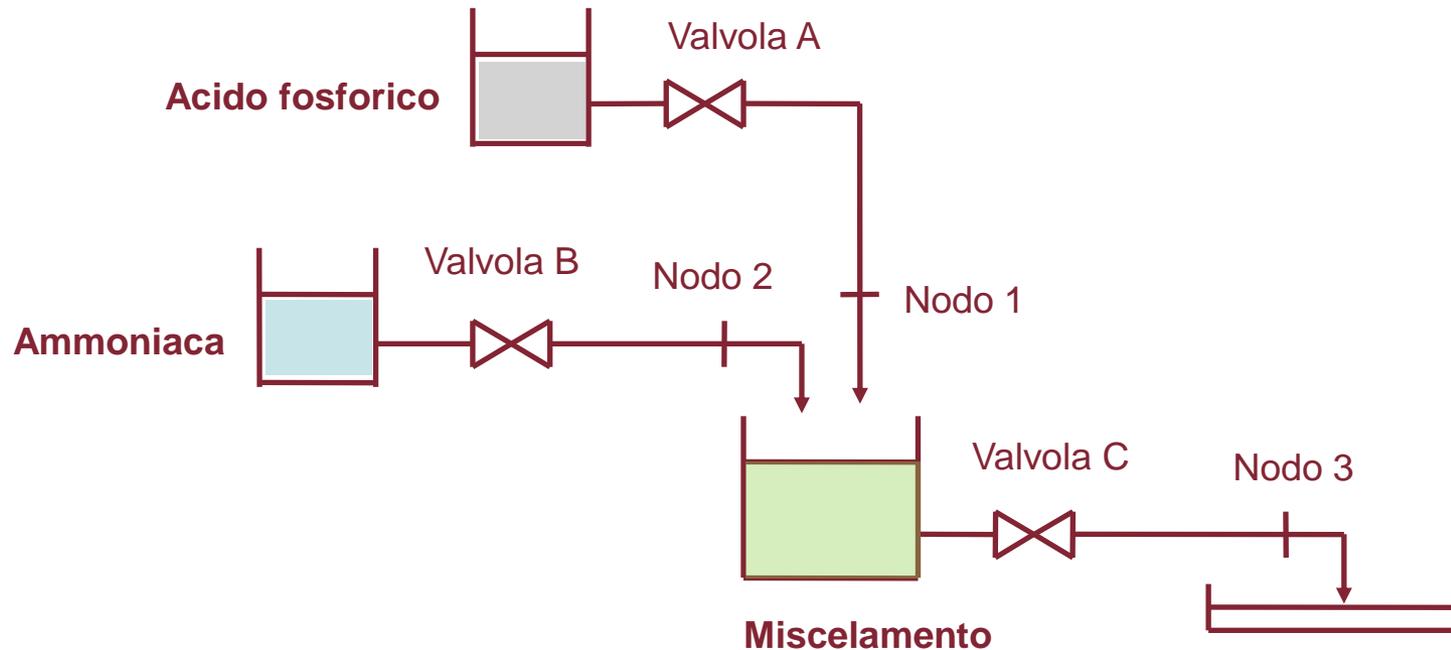
esempio

**NO + Flusso = Nessun flusso**

# HAZOP – Registrazione dei risultati

Esempio:

- Impianto di produzione di fosfato diammonico:



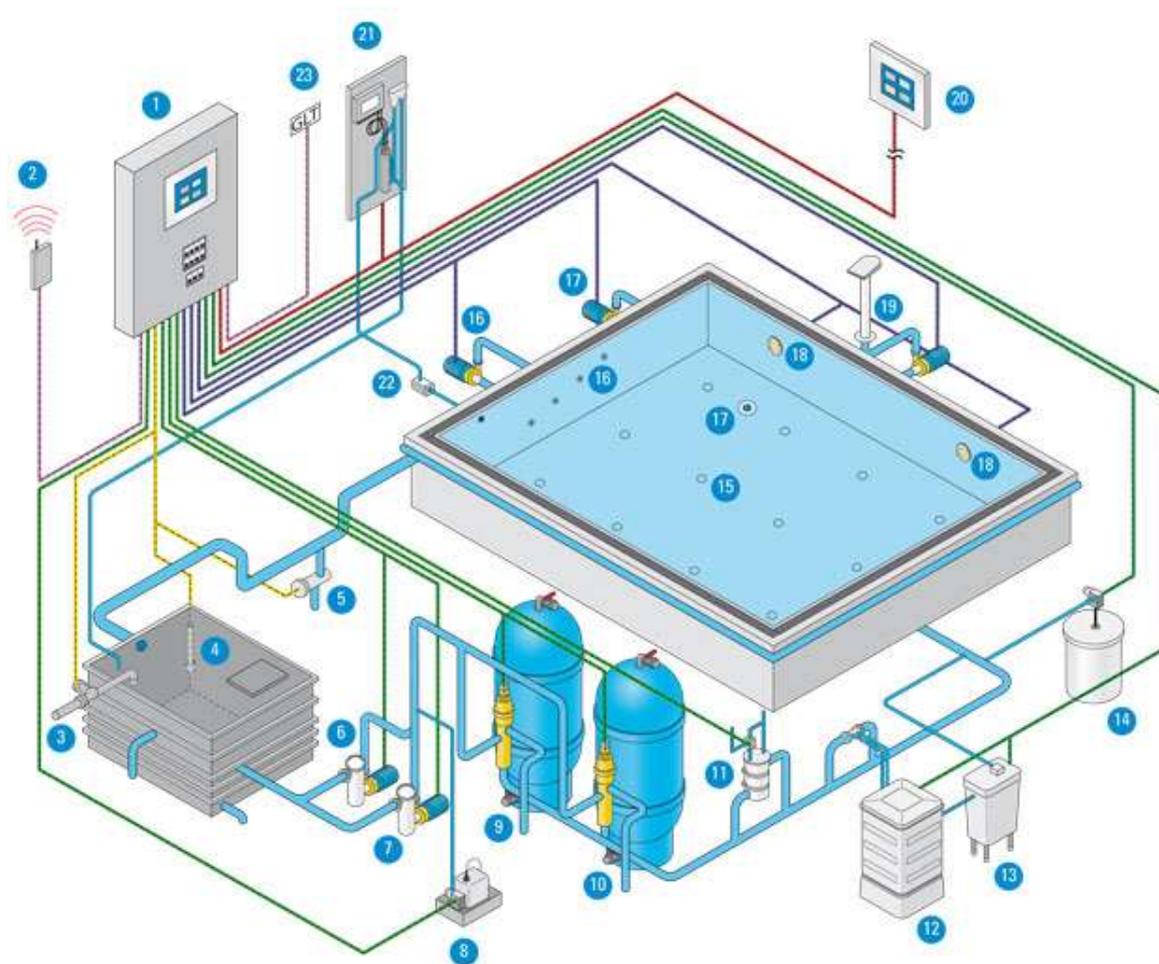
# HAZOP – Registrazione dei risultati

<b>N.</b>	<b>Deviazione</b>	<b>Cause</b>	<b>Conseguenze</b>	<b>Azioni da intraprendere</b>
<b>1.1</b>	<b>NO + portata (nessuna portata al nodo 1)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- la valvola A è chiusa</li> <li>- l'acido fosforico di reattore è esaurito</li> <li>- rottura nel tubo o il tubo è otturato</li> </ul>	Eccesso di ammoniaca nel reattore e perdita nell'area di lavoro (fuoriuscita di vapori di ammoniaca)	Chiusura automatica della valvola B per bassa portata di acido fosforico
<b>1.2</b>	<b>MINORE + portata (diminuzione di portata al nodo 1)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- valvola A parzialmente chiusa</li> <li>- parziale otturazione o perdite nel tubo</li> </ul>	Eccesso di ammoniaca nel reattore e perdita nell'area di lavoro. Tale perdita dipende dalla diminuzione di portata nell'alimentazione di acido fosforico	Chiusura automatica della valvola B se la portata nel tubo di mandata dell'acido fosforico è ridotta. Il set-point viene calcolato in base alla tossicità calcolata come funzione della riduzione di portata dell'acido fosforico
<b>1.3</b>	<b>MAGGIORE + portata (aumento di portata al nodo 1)</b>	-	Non presenta alcun rischio	-
<b>1.4</b>	<b>PARTE DI + portata (diminuisce la concentrazione di acido fosforico al nodo 1)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- fornitura di pessimi materiali</li> <li>- errore nel caricamento del serbatoio di stoccaggio dell'acido fosforico</li> </ul>	Eccesso di ammoniaca nel reattore e perdita nell'area di lavoro. Tale perdita dipende dalla diminuzione di portata nell'alimentazione di acido fosforico	Provvedere ad un controllo della concentrazione di acido fosforico nel serbatoio dopo la procedura di carica

# HAZOP – Registrazione dei risultati

<b>N.</b>	<b>Deviazione</b>	<b>Cause</b>	<b>Conseguenze</b>	<b>Azioni da intraprendere</b>
<b>1.5</b>	<b>ANCHE + portata (incremento della concentrazione di acido fosforico)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- fornitura di pessimi materiali</li> <li>- errore nel caricamento del serbatoio di stoccaggio dell'acido fosforico</li> </ul>	Eccesso di ammoniaca nel reattore e perdita nell'area di lavoro. Tale perdita dipende dalla diminuzione di portata nell'alimentazione di acido fosforico	Provvedere ad un controllo della concentrazione di acido fosforico nel serbatoio dopo la procedura di carica
<b>1.6</b>	<b>INVERSO + portata (flusso contrario al nodo 1)</b>	Nessuna condizione perché il flusso possa essere inverso	-	-
<b>1.7</b>	<b>DIVERSO + portata (diverso reagente nella linea A)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- pessime forniture di componenti</li> <li>- errato reagente immesso nell'impianto</li> </ul>	Dipende dalla sostituzione. Il team deve studiare la pericolosità di questo evento sulla base degli altri reagenti disponibili nel complesso, di caratteristiche simili	Check sui materiali scelti prima di caricare l'acido fosforico nel serbatoio

# HAZOP – Esempio



1. Quadro elettrico
2. Modem GSM
3. Afflusso acqua di riempimento
4. Vasca di compenso con elettrodi di livello
5. Valvola idraulica per pulizia sfioro
6. Pompa di ricircolo 1
7. Pompa di ricircolo 2
8. Impianto di dosaggio per flocculante
9. Impianto di filtrazione 1
10. Impianto di filtrazione 2
11. Scambiatore di calore
12. Apparecchio per la clorazione dell'acqua (clorozono®)
13. Impianto di dosaggio per aumento del pH
14. Impianto di dosaggio per diminuzione del pH
15. Bocchette di immissione
16. Idromassaggio subacqueo
17. impianti per effetti sul fondo
18. Fari subacquei
19. Doccione
20. Telecomando BlueControl®
21. Punto di rilevamento
22. Collegamento al sistema di controllo dell'edificio

Fonte: <http://www.eltab.com/>

<i>Parola Guida</i>	<i>Deviazione</i>	<i>Possibili Cause</i>	<i>Conseguenze</i>	<i>Misure proposte</i>
<b>NO</b>	Non c'è ricircolo dell'acqua	Mancanza di alimentazione	Cattiva qualità dell'acqua	Installare generatore
		Guasto delle pompe	Cattiva qualità dell'acqua	Manutenzione preventiva delle pompe
	Non c'è introduzione di cloro	Mancanza di cloro	Cattiva qualità dell'acqua (acqua non disinfettata)	Installare un sensore di livello nel serbatoio del cloro
		Guasto delle pompe	Cattiva qualità dell'acqua (acqua non disinfettata)	Manutenzione preventiva delle pompe
	Non c'è introduzione di correttore del PH	Mancanza di correttore del PH	Cattiva qualità dell'acqua (acqua con PH inadeguato)	Installare un sensore di livello nel serbatoio del correttore di PH
		Guasto della pompa	Cattiva qualità dell'acqua (acqua con PH inadeguato)	Manutenzione preventiva delle pompe
<b>MINORE</b>	Insufficiente ricircolo di acqua	Guasto delle pompe	Cattiva qualità dell'acqua	Manutenzione preventiva delle pompe
	Insufficiente introduzione di cloro	Guasto nel sistema di misurazione	Cattiva qualità dell'acqua (acqua non disinfettata)	Aumento del numero di controlli e ispezioni del sistema di misurazione
		Guasto delle pompe	Cattiva qualità dell'acqua (acqua non disinfettata)	Manutenzione preventiva delle pompe
	Insufficiente introduzione di correttore del PH	Guasto nel sistema di misurazione	Cattiva qualità dell'acqua (acqua con PH inadeguato)	Aumento del numero di controlli e ispezioni del sistema di misurazione
		Guasto della pompa	Cattiva qualità dell'acqua (acqua con PH inadeguato)	Manutenzione preventiva delle pompe
	<b>MAGGIORE</b>	Introduzione di eccessivo cloro	Guasto nel sistema di misurazione	Formazione di eczemi e eruzioni cutanee alle persone
Introduzione di eccessivo correttore di PH		Guasto nel sistema di misurazione	Cattiva qualità dell'acqua (acqua con PH inadeguato)	Aumento del numero di controlli e ispezioni del sistema di misurazione

# FTA - ETA

**FTA**

**Fault Tree Analysis**

**ETA**

**Event Tree Analysis**

## FTA - Introduzione

La **FTA (Fault Tree Analysis)** è una **tecnica deduttiva** che consente di individuare le possibili **combinazioni di eventi** in grado di condurre l'impianto o il sistema in uno stato indesiderato. Di questi eventi (**top events**) temuti e pericolosi si cercano le possibili cause e si determinano le probabilità di accadimento.

# FTA – Modalità di applicazione

La realizzazione di una analisi FTA prevede una procedura che si articola secondo i seguenti ***passi***:

1. **identificazione dell'evento indesiderato (Top Event)**
2. **costruzione dell'albero dei guasti**
3. **analisi dell'albero**

# FTA – Costruzione del FT

I passi per la costruzione del FT sono:

- definire l'obiettivo dell'analisi
- dividere il sistema in sotto-sistemi
- descrivere ogni sotto-sistema
- definire il Top Event
- determinare le cause del Top Event (fault events)
- determinare una causa per ogni fault event del Top Event
- ripetere il passo precedente fin quando sono stati definiti tutti i fault events al livello più basso di analisi (cioè fino all'evento base)

## FTA – Costruzione del FT

Gli elementi fondamentali per la costruzione dell'albero sono, quindi, le porte logiche e gli eventi che vengono riportati facendo uso di schematizzazioni grafiche che facilitano l'utilizzo e la comprensione dell'albero stesso.

# FTA – Porte logiche

Esempi di porte logiche utilizzate:

**porte AND** rappresentano il verificarsi dell'evento in output solo quando si verificano tutti gli eventi in input



**porte OR** rappresentano il verificarsi dell'evento in output quando si verifica almeno uno degli eventi in input

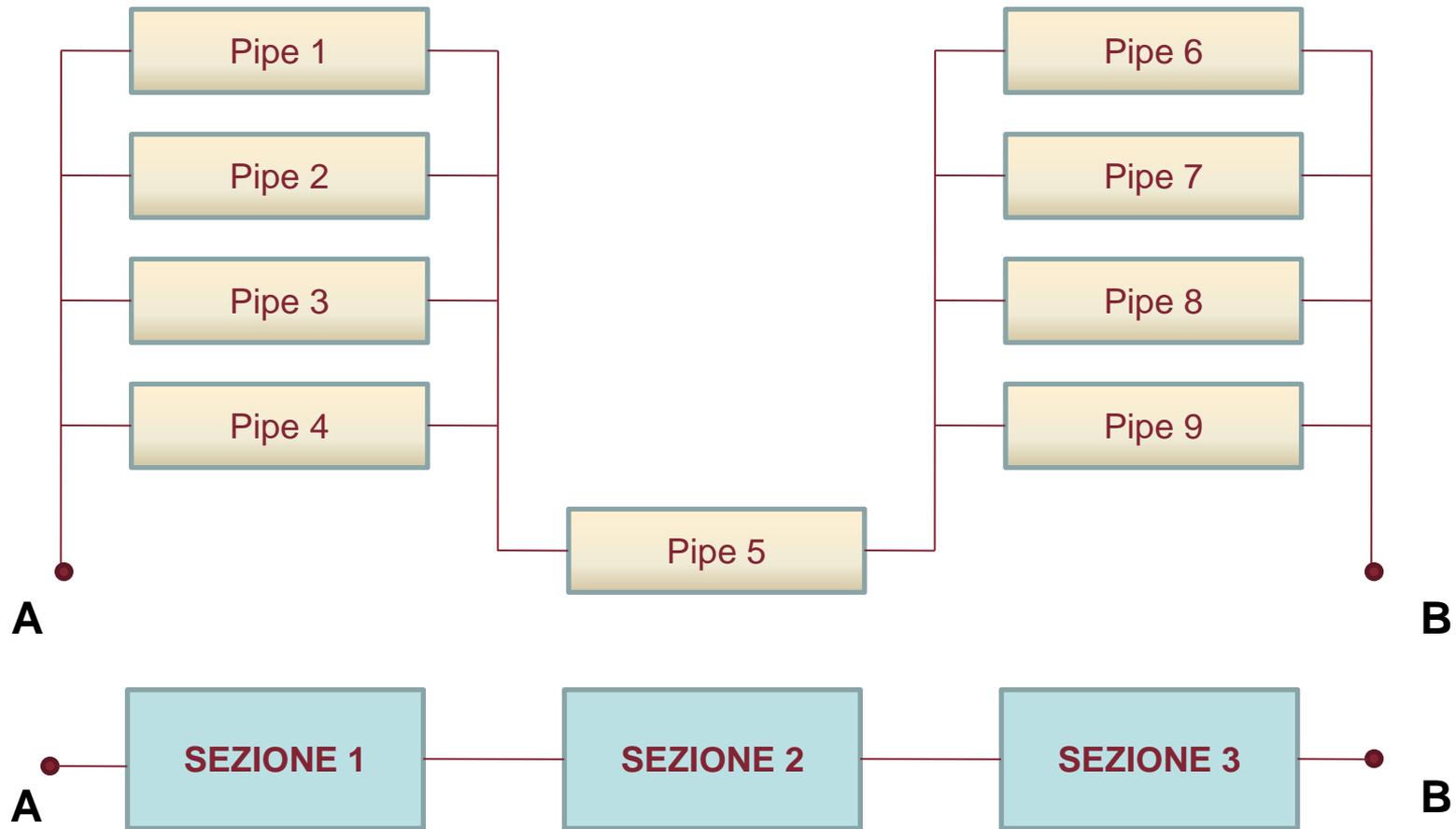


# FTA – Eventi

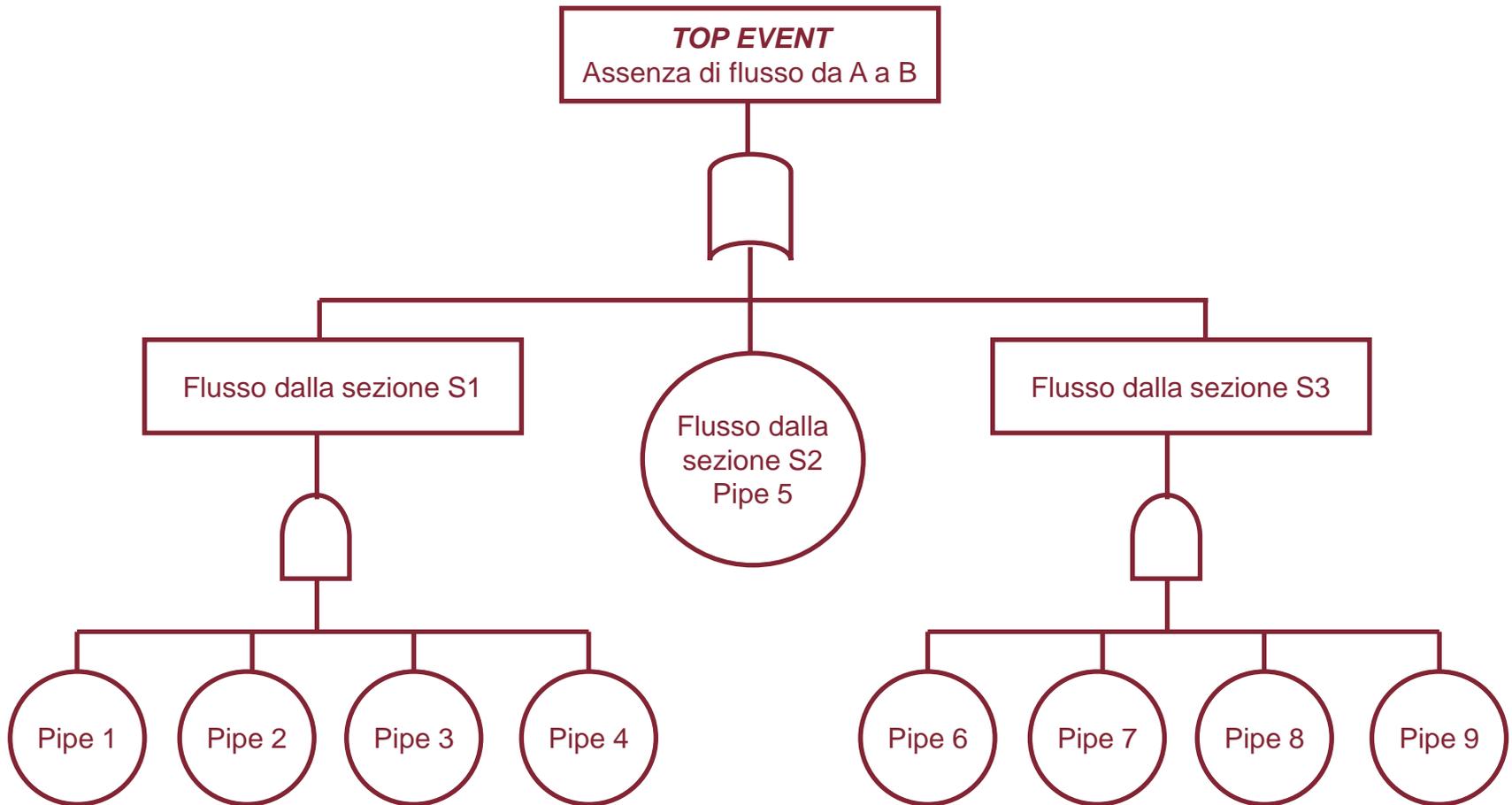
Gli eventi sono così schematizzati:

- ❑ **EVENTO BASE:** è un guasto di partenza (di base) per il quale non sono necessari ulteriori dettagli
- ❑ **EVENTO CONSUETO:** il suo accadimento è normalmente atteso
- ❑ **EVENTO PRIMARIO:** non viene sviluppato in una catena di eventi perché ha scarse conseguenze e non si hanno sufficienti informazioni disponibili
- ❑ **TOP EVENT:** l'evento indesiderato le cui conseguenze sono gravi e da scongiurare

# FTA – Esempio di FT



# FTA – Esempio di FT



## FTA – Analisi del FT

Al termine della costruzione dell'albero sono identificati i “**cammini**” (**cut-sets**) definiti come una combinazione di eventi che causano il top event.

A questo punto è possibile effettuare l'analisi qualitativa e quantitativa dell'albero.

## FTA – Analisi del FT

In generale si procede secondo i seguenti punti:

- determinare i più “piccoli” cut-sets per semplificare l’albero
- determinare la probabilità di ogni evento di input
- combinare la probabilità di input alle porte logiche
- continuare a combinare le probabilità degli input fin quando risulta determinata quella del Top Event

## FTA – Analisi del FT

Completata l'analisi qualitativa, che consente, attraverso l'uso dell'algebra Booleana, di determinare i ***minimal cut-sets***, si procede con l'analisi quantitativa.

Per effettuare l'analisi quantitativa è necessario ottenere da diverse fonti delle informazioni per giungere alla determinazione dell'affidabilità e dell'inaffidabilità dell'evento in esame.

## FTA – Analisi del FT

Per migliorare il sistema oggetto dell'analisi devono essere esaminati tutti i componenti con un'alta probabilità di fallimento per operare le opportune correzioni. Ad esempio:

- ✓ sostituzione di alcuni componenti critici
- ✓ cambiamento della configurazione del sistema
- ✓ aggiunta di elementi ridondanti
- ✓ pianificazione di interventi manutentivi periodici per la sostituzione programmata degli elementi critici
- ✓ ecc.

## MCS - Esempio

La semplificazione avviene applicando le regole dell'algebra di Boole attraverso le quale si giunge a trovare un nuovo albero, più semplice da studiare, ma logicamente equivalente al precedente.

Le proprietà dell'analisi logica di Boole, applicabili allo studio degli alberi di guasto nell'ottica di ricercare i minimal cut sets, sono le seguenti:

## MCS - Esempio

proprietà commutativa

$$A \cup B = B \cup A$$

$$A \cap B = B \cap A$$

proprietà associativa

$$A \cap (B \cap C) = (A \cap B) \cap C$$

$$A \cup (B \cup C) = (A \cup B) \cup C$$

proprietà distributiva

$$A \cap (B \cup C) = A \cap B \cup A \cap C$$

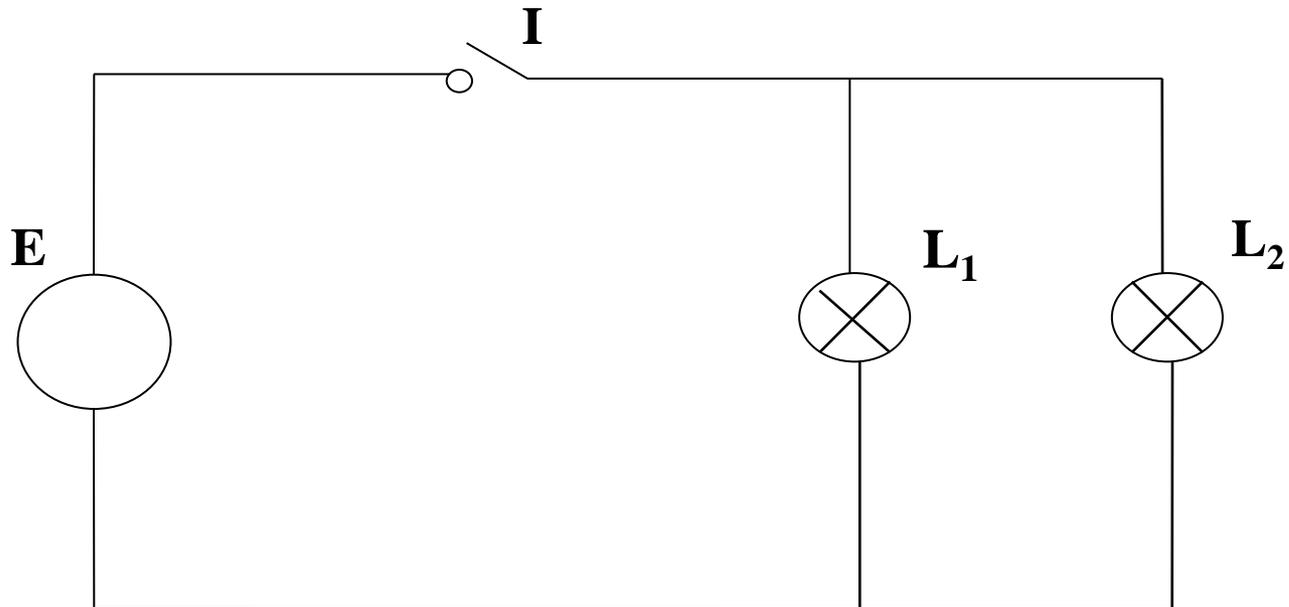
proprietà di assorbimento

$$A \cup A = A$$

$$A \cap A = A$$

# MCS - Esempio

Si supponga di avere il circuito rappresentato nella Figura:



## MCS - Esempio

Esso consiste di due lampade collegate in parallelo ( $L_1$  ed  $L_2$ ), un interruttore ( $I$ ) ed un generatore ( $G$ ).

Il primo passo da compiere consiste nella costruzione dell'albero di guasto e, quindi, nell'individuazione del top event innanzi tutto.

Supponiamo che l'evento di guasto da scongiurare sia l'assenza di luce, come è facile immaginare.

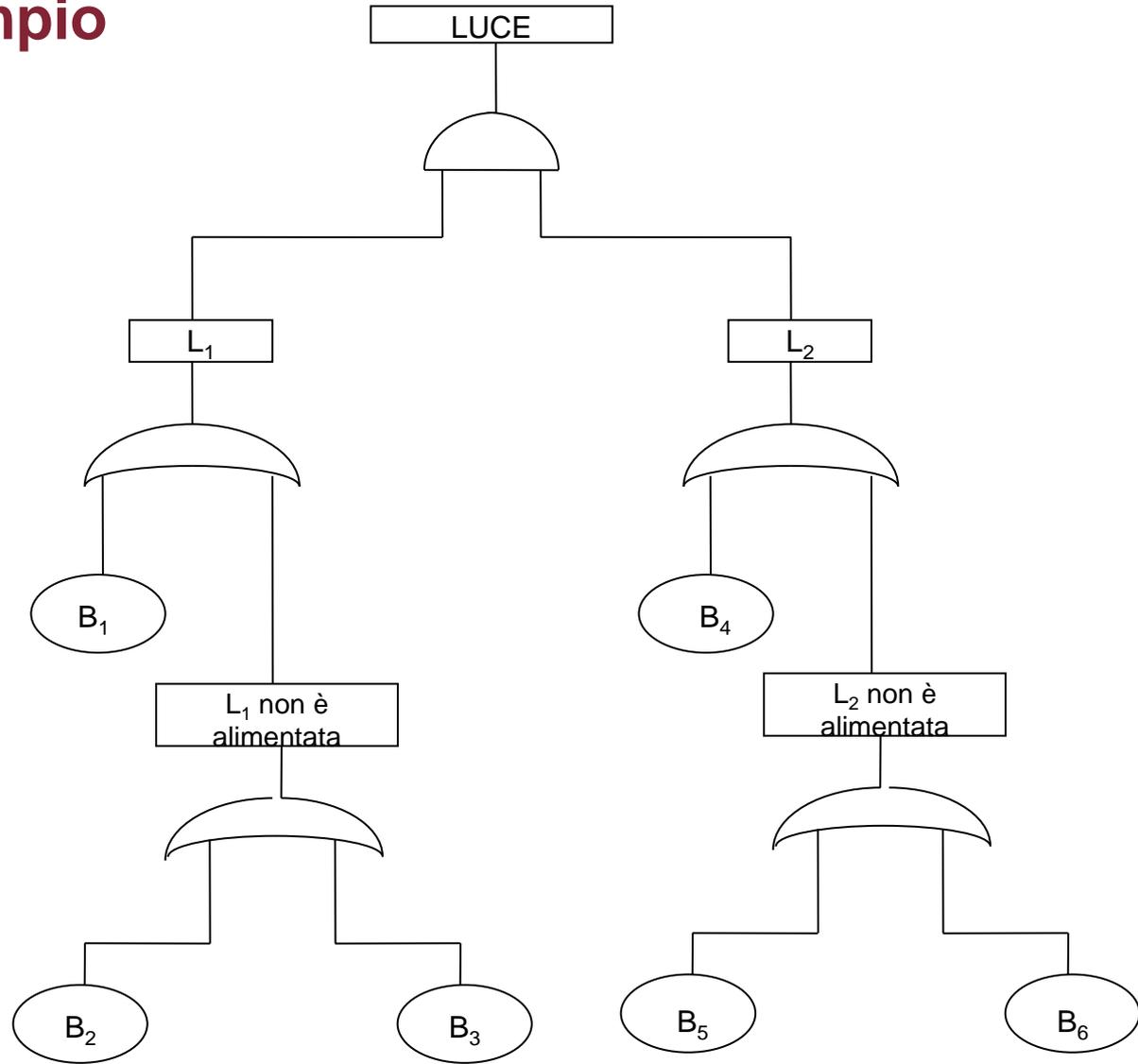
## MCS - Esempio

Affinché si verifichi tale circostanza, le due lampade non devono funzionare, o perché le due lampade sono guaste o perché si verificano altri eventi, quali il guasto dell'interruttore o il guasto del generatore.

L'albero di guasto rappresentativo del circuito della Figura precedente e degli eventi appena descritti è presentato nella successiva Figura:

# MCS - Esempio

Albero dei Guasti



## MCS - Esempio

Il passo successivo per trovare i minimal cut sets consiste nella determinazione delle equazioni analitiche rappresentative dell'albero.

Tenuto conto del significato degli eventi base  $B_i$ :

- ◆  $B_1 =$  lampada  $L_1$  guasta;
- ◆  $B_2 = B_5 =$  interruttore guasto;
- ◆  $B_3 = B_6 =$  generatore guasto;
- ◆  $B_4 =$  lampada  $L_2$  guasta;

## MCS - Esempio

Si giunge alla seguente equazione generale, in cui TE è il top event ed  $I_1$  e  $I_2$  sono gli eventi intermedi corrispondenti alle situazioni per cui le lampade  $L_1$  ed  $L_2$  non funzionano, rispettivamente:

$$\begin{aligned} 0 \cdot 0 &= 0 \\ 0 \cdot 1 &= 0 \\ 1 \cdot 0 &= 0 \\ 1 \cdot 1 &= 1 \end{aligned}$$

Porta logica AND  $Y = A \cdot B$

A	B	Y
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1



$$\begin{aligned} 0 + 0 &= 0 \\ 0 + 1 &= 1 \\ 1 + 0 &= 1 \\ 1 + 1 &= 1 \end{aligned}$$

Porta logica OR  $Y = A + B$

A	B	Y
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1



$$TE = I_1 I_2 = [B_1 + (B_2 + B_3)][B_4 + (B_5 + B_6)] \quad (1)$$

Poiché  $B_2 = B_5$  e  $B_3 = B_6$ , si ha:

$$TE = I_1 I_2 = [B_1 + (B_2 + B_3)][B_4 + (B_2 + B_3)] \quad (2)$$

## MCS - Esempio

E quindi, in base alle proprietà della logica di Boole:

$$TE = B_1B_4 + B_1(B_2 + B_3) + B_4(B_2 + B_3) + (B_2 + B_3)(B_2 + B_3) \quad (3)$$

$$TE = B_2 + B_3 + (B_1 + B_4)(B_2 + B_3) + B_1B_4 \quad (4)$$

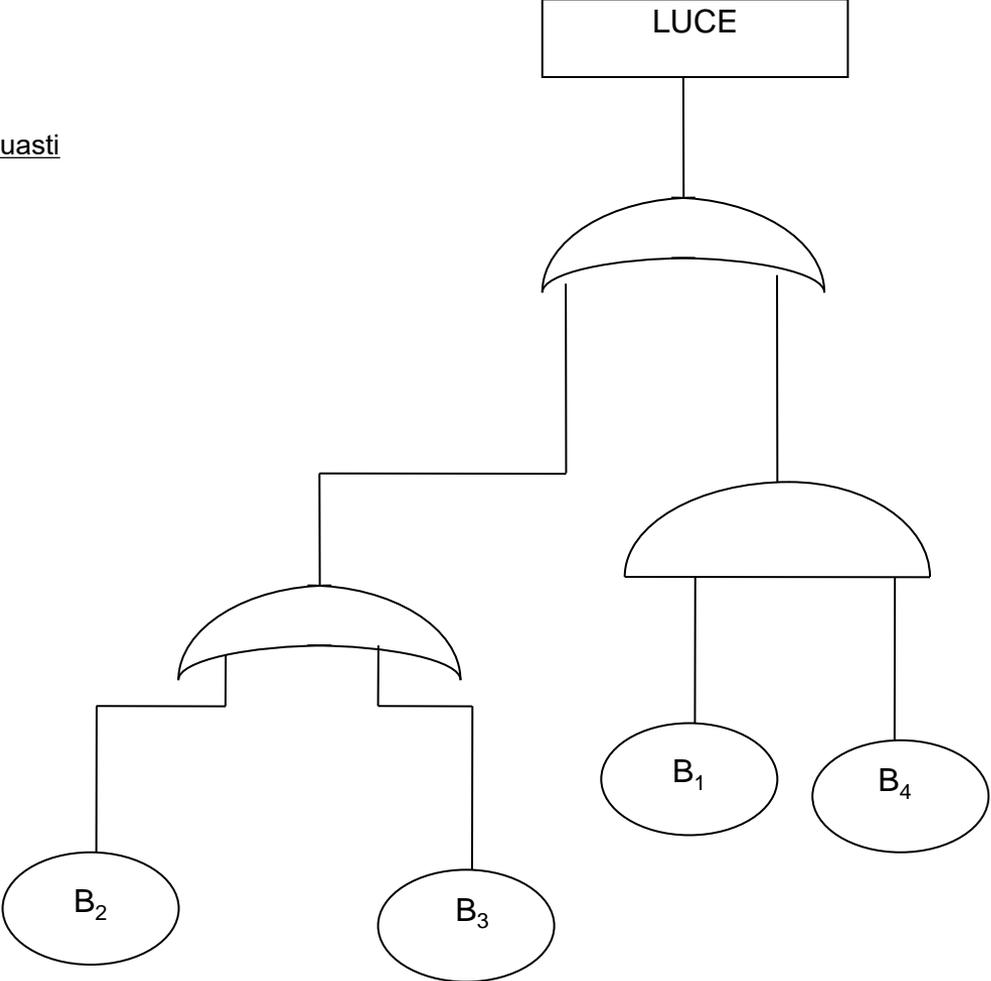
e, infine:

$$TE = B_1B_4 + (B_2 + B_3) \quad (5)$$

dalla quale è possibile ricavare l'albero equivalente:

# MCS - Esempio

Albero Equivalente dell'Albero dei Guasti



## MCS - Esempio

L'equazione (5) rappresenta il numero minimo di cammini necessari e sufficienti a determinare il verificarsi del top event, come è facile provare. In particolare, la relazione ci dice che il top event si verifica quando:

- entrambi le lampade  $L_1$  ed  $L_2$  sono guaste, oppure quando
- o l'interruttore o il generatore sono guasti.

# FTA – Esempio

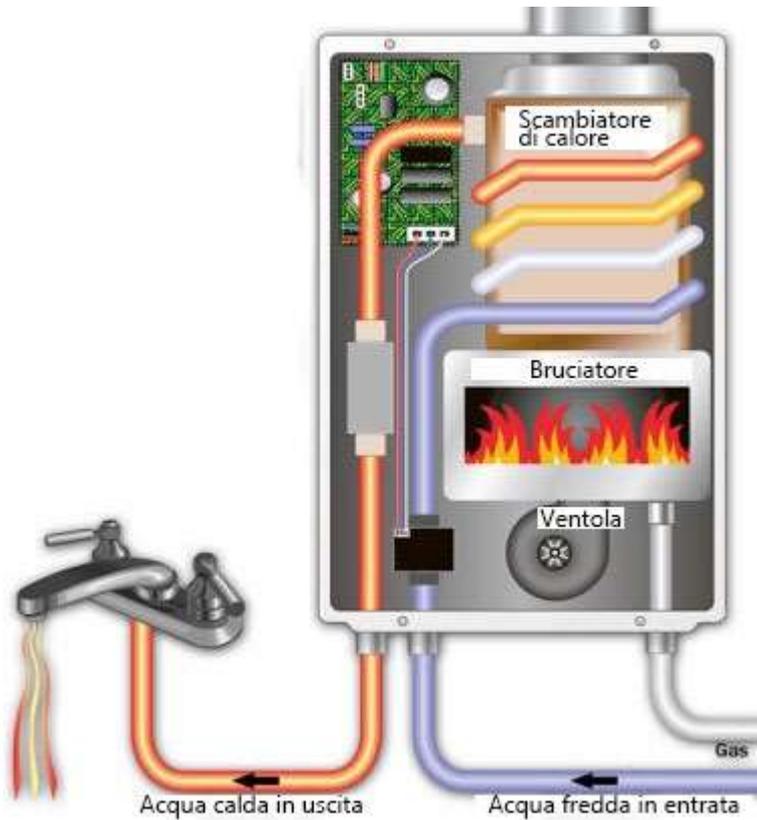
## Caldaia a gas

Top Event = Rottura del serbatoio dell'acqua

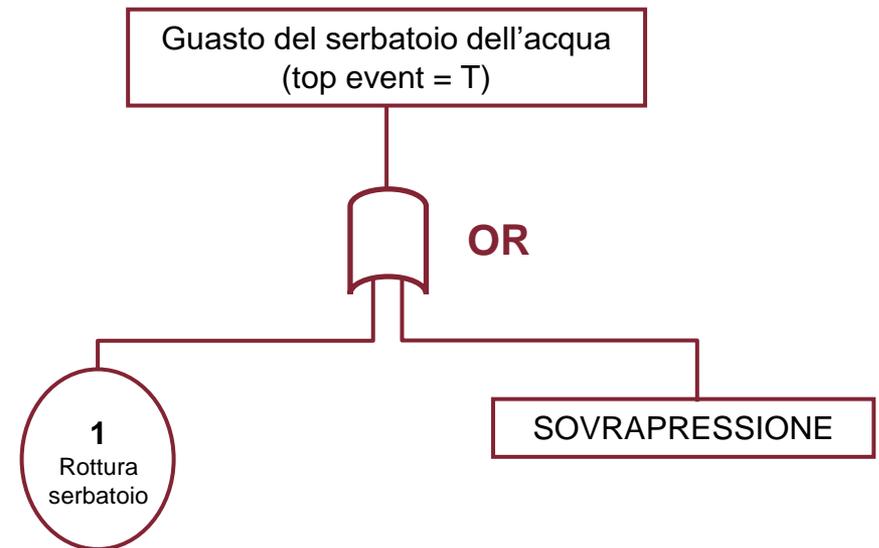


Rottura del serbatoio dell'acqua  
(top event = T)

# FTA – Esempio



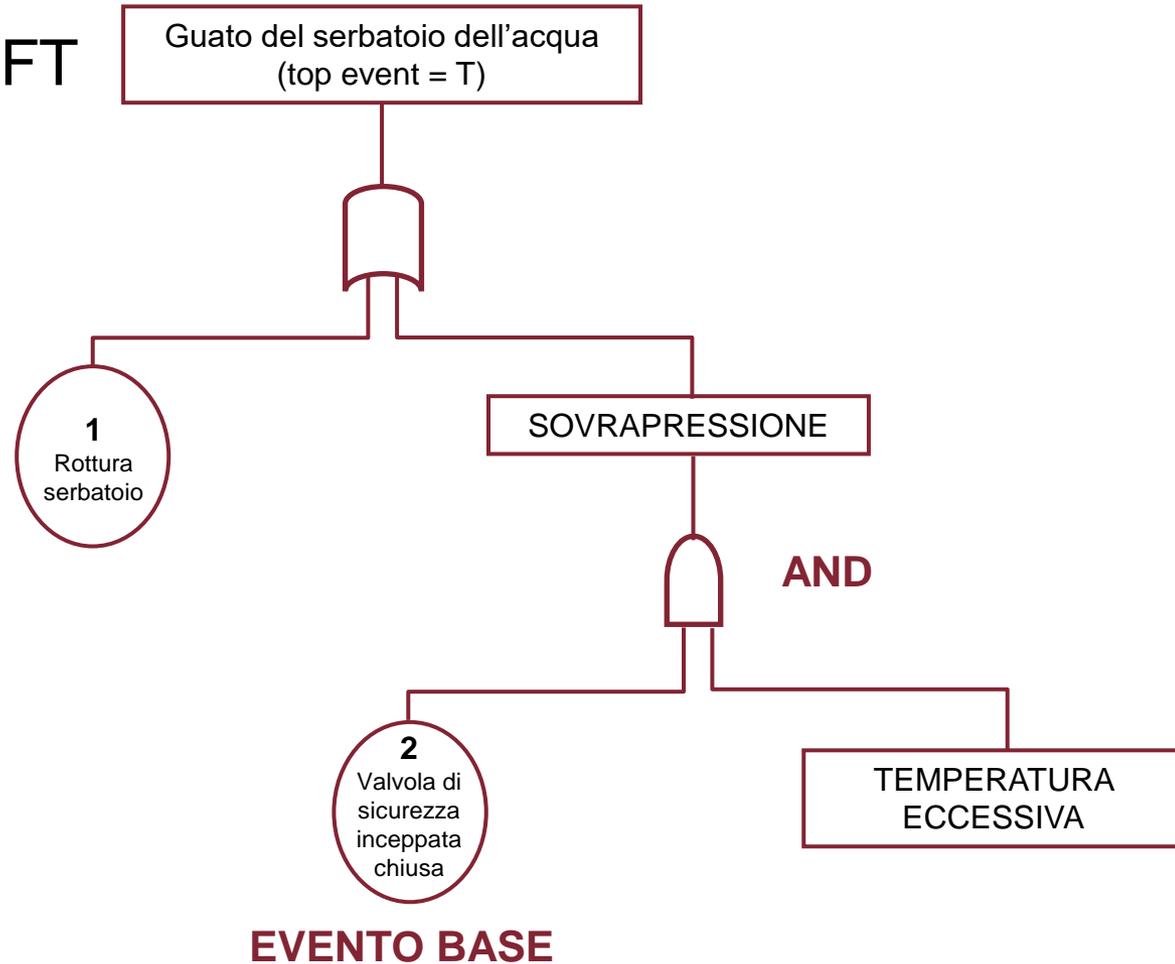
## Costruzione del FT

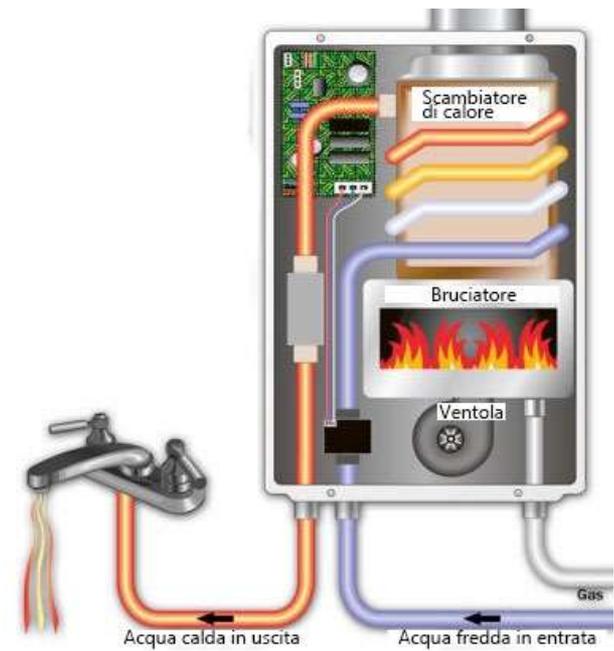
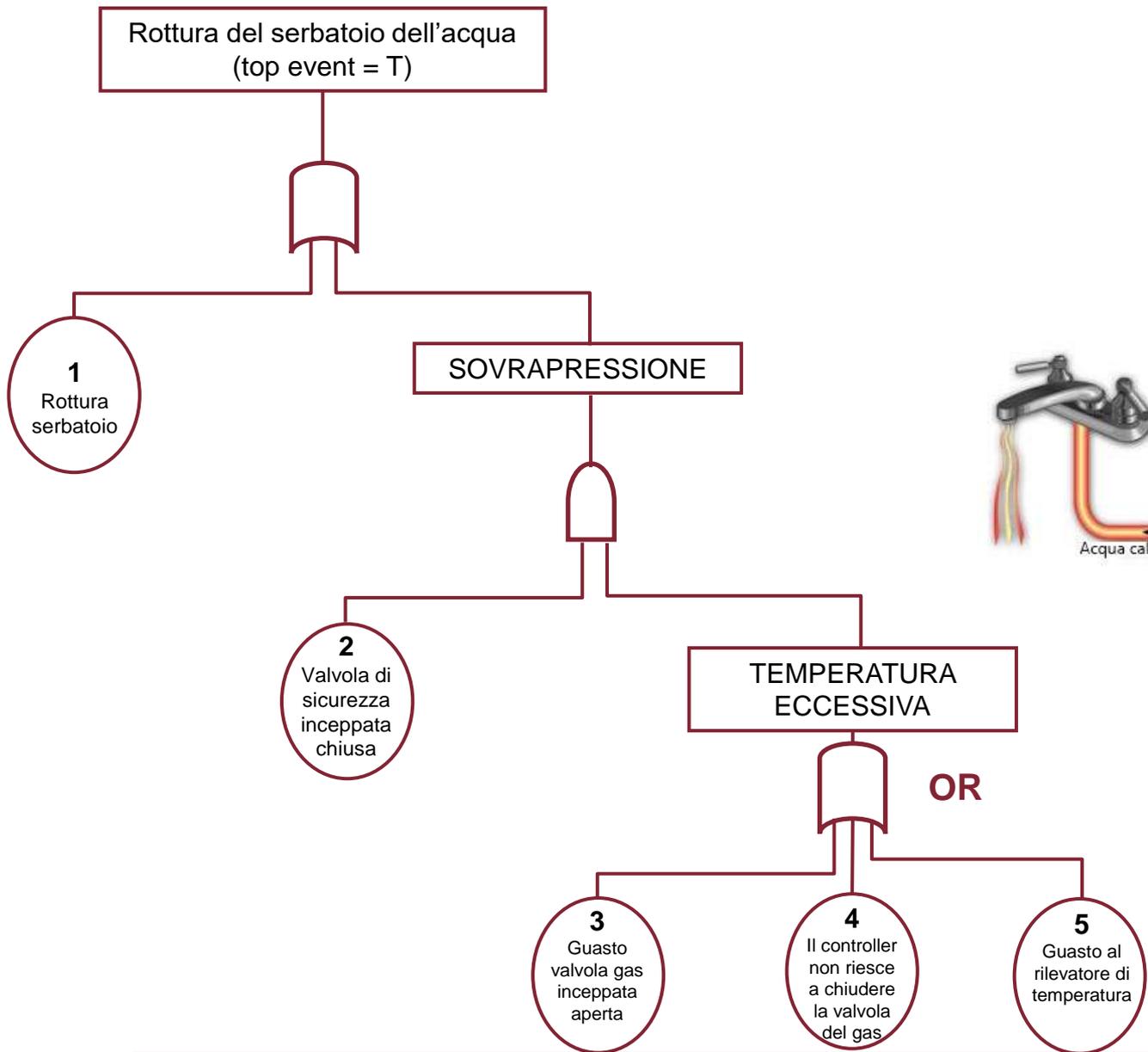


**EVENTO BASE**

# FTA – Esempio

## Costruzione del FT





**EVENTI BASE**

# FTA – Analisi qualitativa

Introduciamo:

- $X_i$  variabile binomiale indicatrice dello stato dell' $i$ -esimo componente (Evento di base)

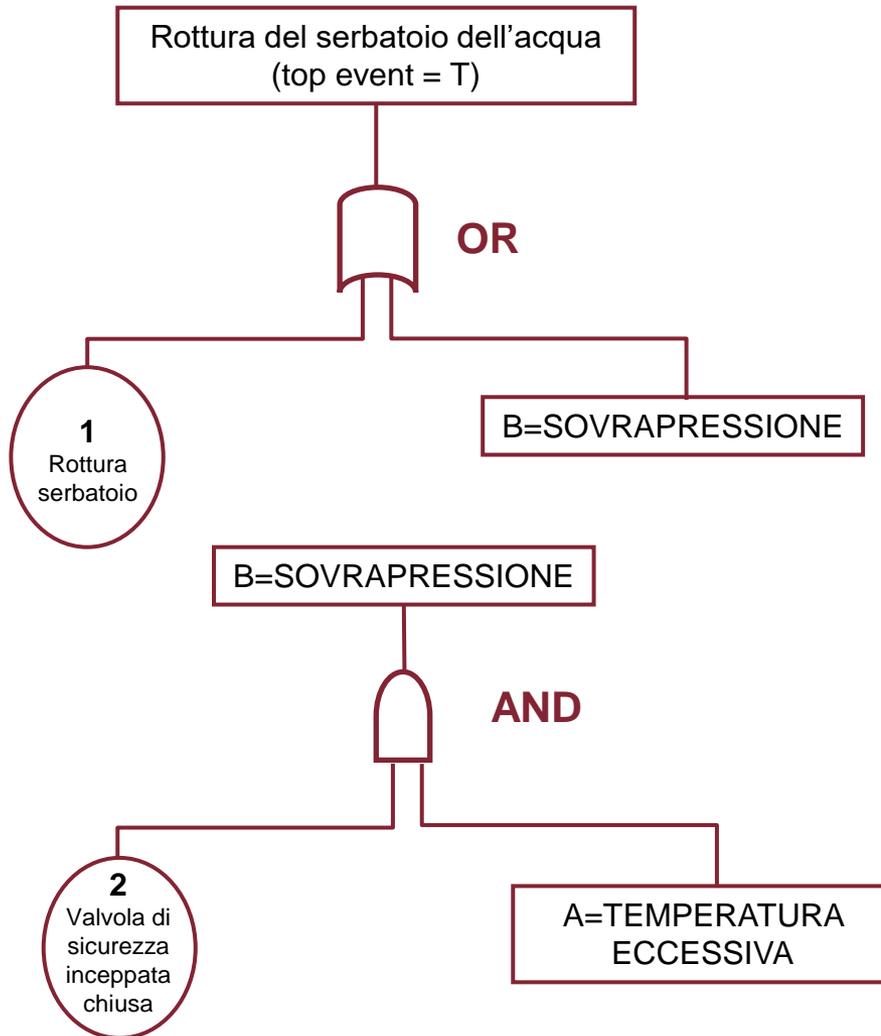
$X_i=1$  evento di guasto VERO

$X_i=0$  evento di guasto FALSO

- Un insieme di equazioni algebriche booleane (una per ogni gate) per determinare la struttura della funzione  $\Phi$

$$X_T = \Phi(X_1, X_2, \dots, X_n)$$

# FTA – Analisi qualitativa



**OR gate**

$$X_T = 1 - (1 - X_1)(1 - X_B) = X_1 + X_B - X_1 X_B$$

**AND gate**

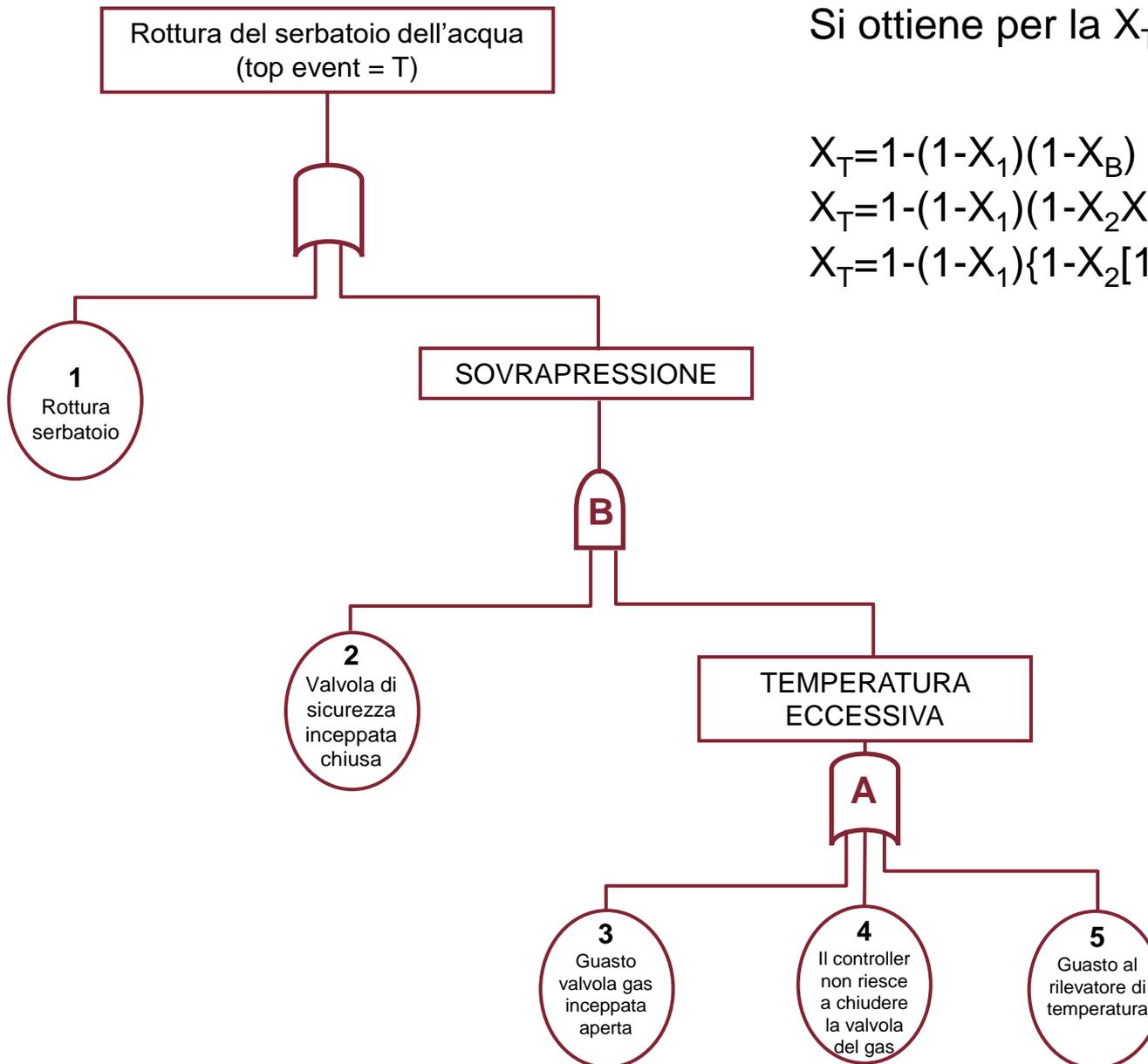
$$X_B = X_2 X_A$$

Si ottiene per la  $X_T = \Phi(X_1, X_2, X_3, X_4, X_5)$ :

$$X_T = 1 - (1 - X_1)(1 - X_B)$$

$$X_T = 1 - (1 - X_1)(1 - X_2 X_A)$$

$$X_T = 1 - (1 - X_1)\{1 - X_2[1 - (1 - X_3)(1 - X_4)(1 - X_5)]\}$$



# FTA – Analisi qualitativa

$$X_T = \Phi(X_1, X_2, X_3, X_4, X_5)$$

Eseguendo alcuni passaggi si ottiene

$$X_T = 1 - (1 - X_1)(1 - X_2X_3 - X_2X_4 - X_2X_5 + X_2X_3X_4 + X_2X_3X_5 + X_2X_4X_5 - X_2X_3X_4X_5)$$

L'equazione si può ridurre per trovare i **minimal cut sets**

$$X_T = 1 - (1 - X_1)(1 - X_2X_3)(1 - X_2X_5)(1 - X_2X_4)$$

Minimal cut sets:

$$M_1 = \{X_1\}$$

$$M_2 = \{X_2, X_3\}$$

$$M_3 = \{X_2, X_5\}$$

$$M_4 = \{X_2, X_4\}$$



$X_1$  e  $X_2$  che appaiono in più mcs sono “critici” in base all’analisi qualitativa

# FTA – Analisi quantitativa

Ipotizziamo di assegnare i seguenti valori alle variabili  $X_i$ :

$$X_1=0.1$$

$$X_2=0.1$$

$$X_3=0.1$$

$$X_4=0.1$$

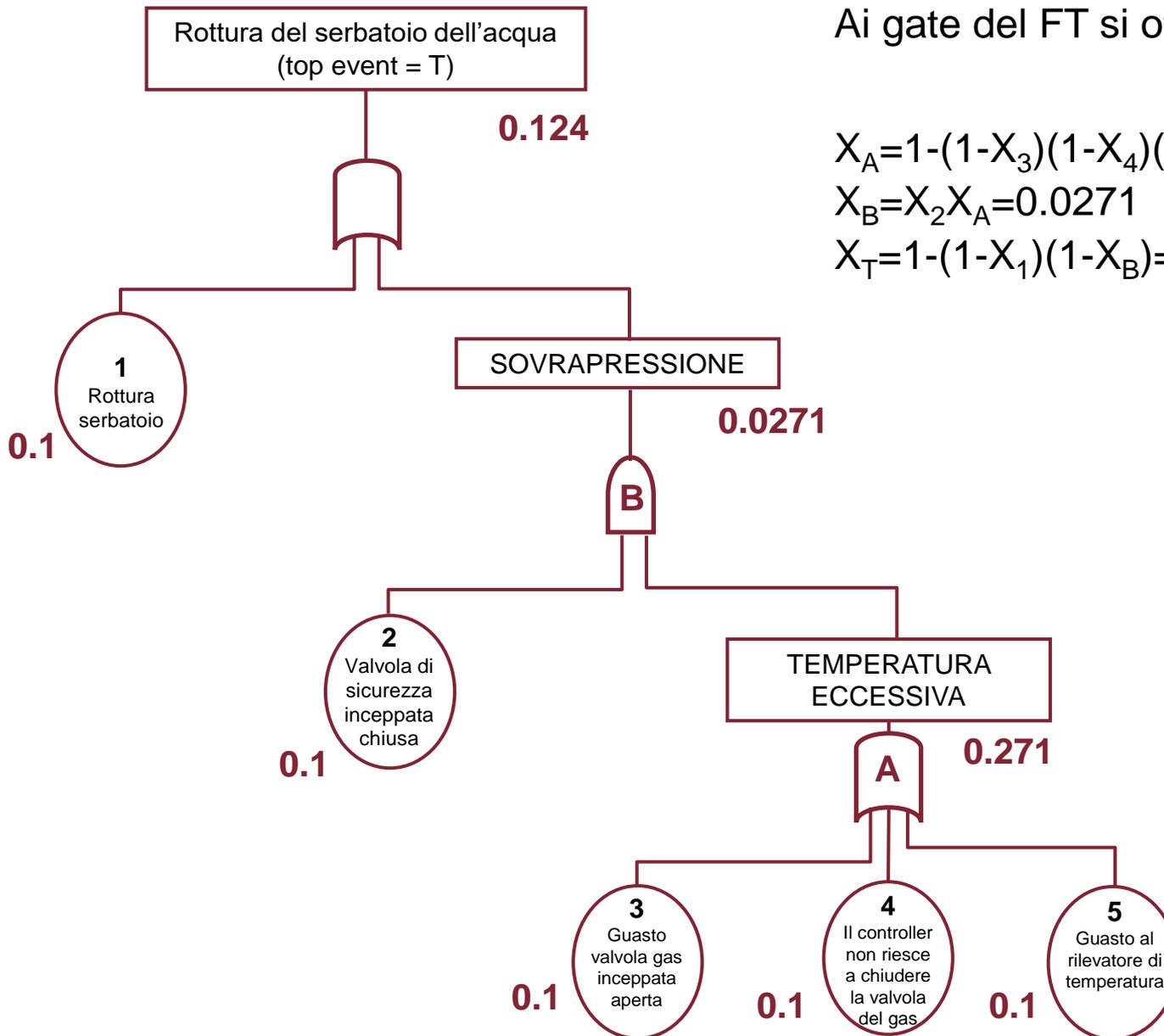
$$X_5=0.1$$

Ai gate del FT si ottiene:

$$X_A = 1 - (1 - X_3)(1 - X_4)(1 - X_5) = 0.271$$

$$X_B = X_2 X_A = 0.0271$$

$$X_T = 1 - (1 - X_1)(1 - X_B) = 0.124$$



# FTA – Analisi quantitativa

Utilizzando gli mcs determinati con l'analisi qualitativa

$$P[\Phi(\underline{X}) = 1] = \sum_{j=1}^{mcs} P[M_j] - \sum_{i=1}^{mcs-1} \sum_{j=i+1}^{mcs} P[M_i M_j] + \dots + (-1)^{mcs+1} P\left[\prod_{j=1}^{mcs} M_j\right]$$

Si può dimostrare che:

$$\sum_{j=1}^{mcs} P[M_j] - \sum_{i=1}^{mcs-1} \sum_{j=i+1}^{mcs} P[M_i M_j] \leq P[\Phi(\underline{X}) = 1] \leq \sum_{j=1}^{mcs} P[M_j]$$

## FTA – Analisi quantitativa

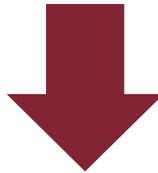
**4 mcs:**

$$P(M_1) = P(X_1 = 1) = 0.1$$

$$P(M_2) = P(X_2 X_3 = 1) = 0.1 \cdot 0.1 = 0.01$$

$$P(M_3) = P(X_2 X_4 = 1) = 0.1 \cdot 0.1 = 0.01$$

$$P(M_4) = P(X_2 X_5 = 1) = 0.1 \cdot 0.1 = 0.01$$



$$P[\Phi(\underline{X}) = 1] \leq \sum_{j=1}^{mcs} P[M_j] = 0.13$$

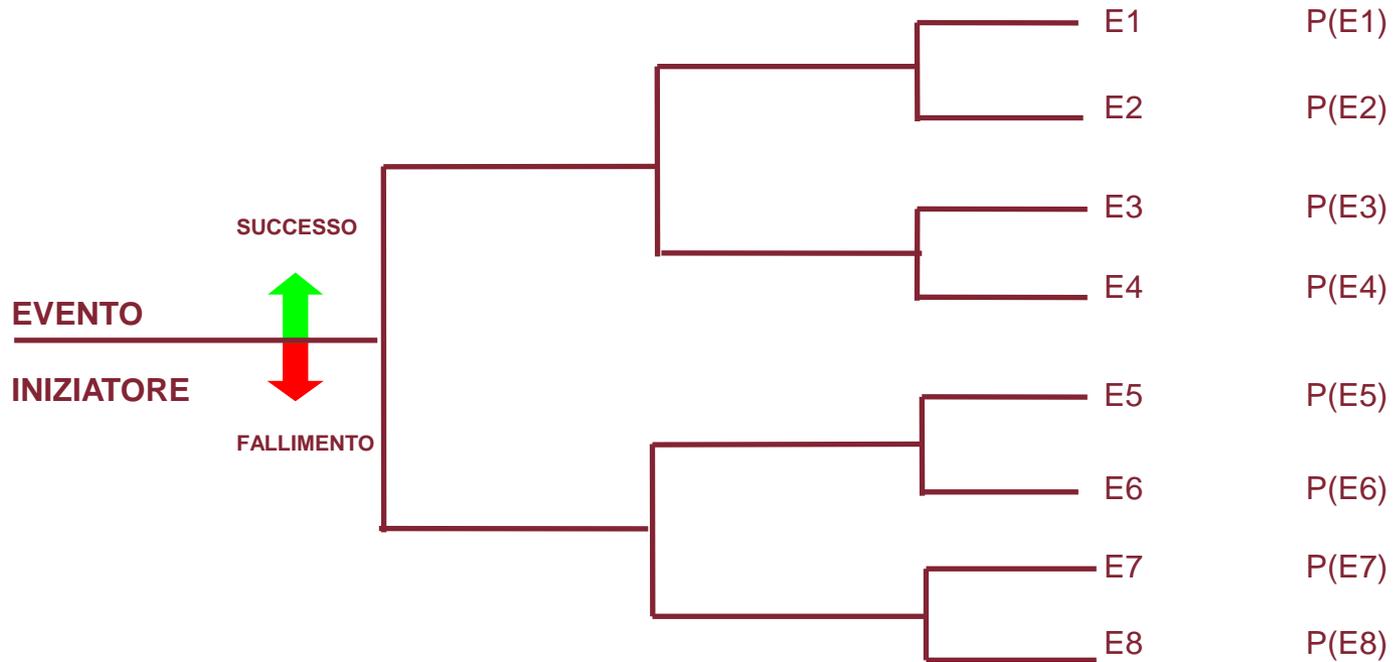
$$P[\Phi(\underline{X}) = 1] \geq \sum_{j=1}^{mcs} P[M_j] - \sum_{i=1}^{mcs-1} \sum_{j=i+1}^{mcs} P[M_i M_j] = 0.1267$$

## ETA – Introduzione

L'**ETA** (**Event Tree Analysis**) è una metodologia logica induttiva che trae origine da applicazioni in campo economico e finanziario e che poi è stata utilizzata anche in campo industriale per evidenziare **tutti i possibili scenari incidentali derivanti dall'evoluzione di un evento iniziatore**, in rapporto o meno all'intervento di sistemi preposti alla protezione dell'impianto, dell'ambiente esterno e del personale.

# ETA – Esempio di ET

SISTEMA 1	SISTEMA 2	SISTEMA 3	SCENARIO	PROBABILITA'
-----------	-----------	-----------	----------	--------------



# ETA – Esempio di ET

Rottura delle tubazioni

POTENZA ELETTRICA	SISTEMA DI RAFFREDD. DI EMERGENZA	INTEGRITA' DEL CONTENIMENTO	SCENARIO	PROBABILITA' CONSEQUENZE
-------------------	-----------------------------------	-----------------------------	----------	--------------------------



## ETA – Modalità di applicazione

La generica **foglia** dell'albero rappresenta un **possibile scenario** che si verificherebbe in corrispondenza di una particolare combinazione di eventi. Le probabilità che caratterizzano ogni nodo sono probabilità condizionate e quindi devono essere definite in relazione alla situazione che si è delineata nei nodi precedenti a quello in esame.

***In fase di calcolo la probabilità del singolo scenario è rappresentata dal semplice prodotto delle probabilità che si trovano sui rami che collegano la foglia con il top event.***

# ETA – Modalità di applicazione

L'analisi ETA si articola in 4 fasi:

1. identificazione degli eventi iniziatori
2. identificazione delle funzioni di sicurezza coinvolte nelle sequenze incidentali
3. sviluppo dell'albero
4. analisi dei risultati della sequenza incidentale

## ETA – Identificazione degli eventi iniziatori

La definizione degli eventi può essere il risultato di una valutazione tecnologica basata su un'analisi di rischio effettuata in precedenza, su incidenti verificatesi e comunque sull'esperienza e sulla sensibilità dell'analista. Le principali classi di eventi iniziatori riguardano:

- ✓ rotture o guasti di componenti o di sistemi
- ✓ errori umani
- ✓ processi che non hanno avuto luogo, o che possono dar luogo ad effetti negativi
- ✓ malfunzionamenti delle strutture
- ✓ cause esterne

## ETA – Identificazione delle funzioni di sicurezza

Nella identificazione e valutazione delle funzioni di sicurezza, sono considerate solo due possibilità, il loro **successo** o l'**insuccesso**.

In genere le funzioni di sicurezza includono:

- sistemi di sicurezza
- sistemi di allarme
- azioni degli operatori richieste dalle procedure in caso di allarme

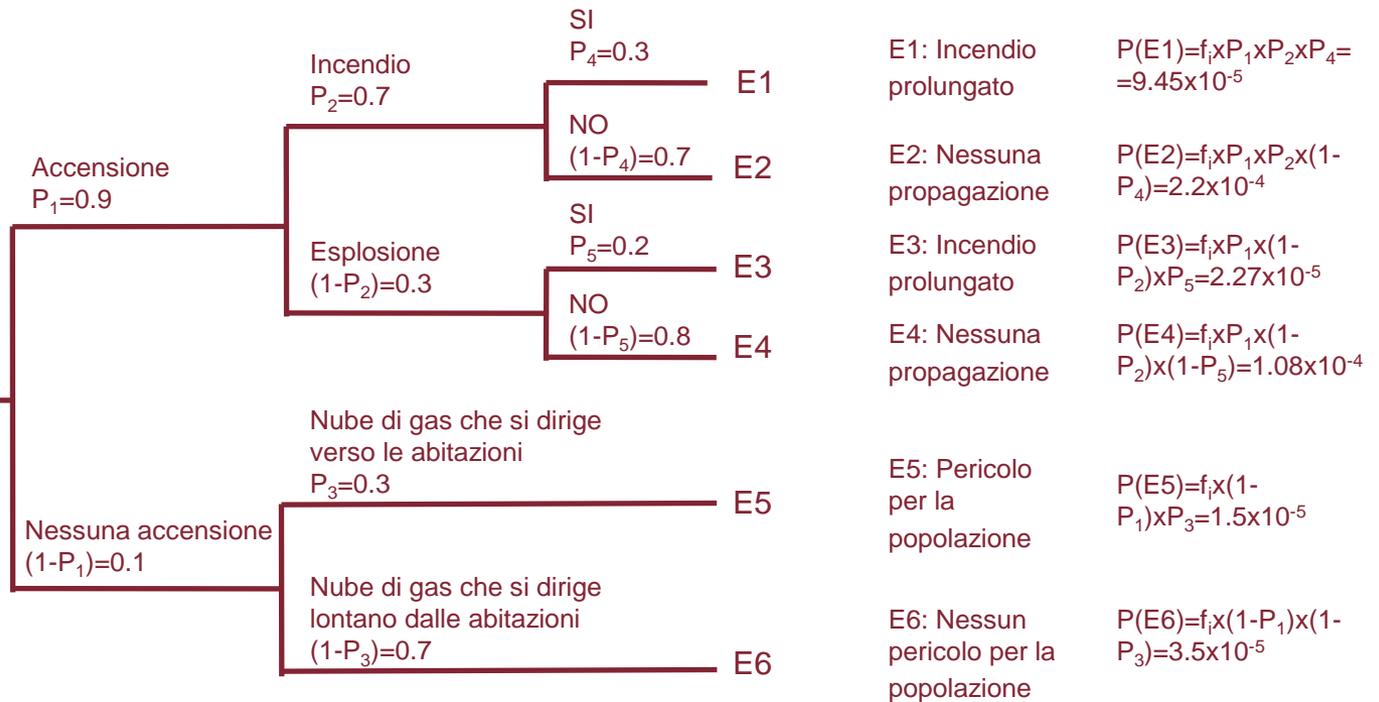
# ETA – Esempio di ET

ACCENSIONE	INCENDIO / ESPLOSIONE / NUVOLE DI GAS	PROPAGAZIONE AGLI IMPIANTI ADIACENTI	SCENARIO	PROBABILITA'
------------	---------------------------------------	--------------------------------------	----------	--------------



## FUORIUSCITA DI GAS INFIAMMABILE

$f_i = 0.5 \times 10^{-4}$  eventi/anno



# ETA – Esempio di ET

## CASO STUDIO

Consideriamo un sito nel quale è presente un deposito di gas tossici e nel quale lavora una persona.

Il deposito è soggetto a perdite e perciò è stato installato un rilevatore di gas. Quando si ha una perdita di gas, il suono di un allarme avvisa il lavoratore che deve lasciare immediatamente il sito. Non tutte le fuoriuscite di gas implicano necessariamente la presenza di gas nel luogo di lavoro.

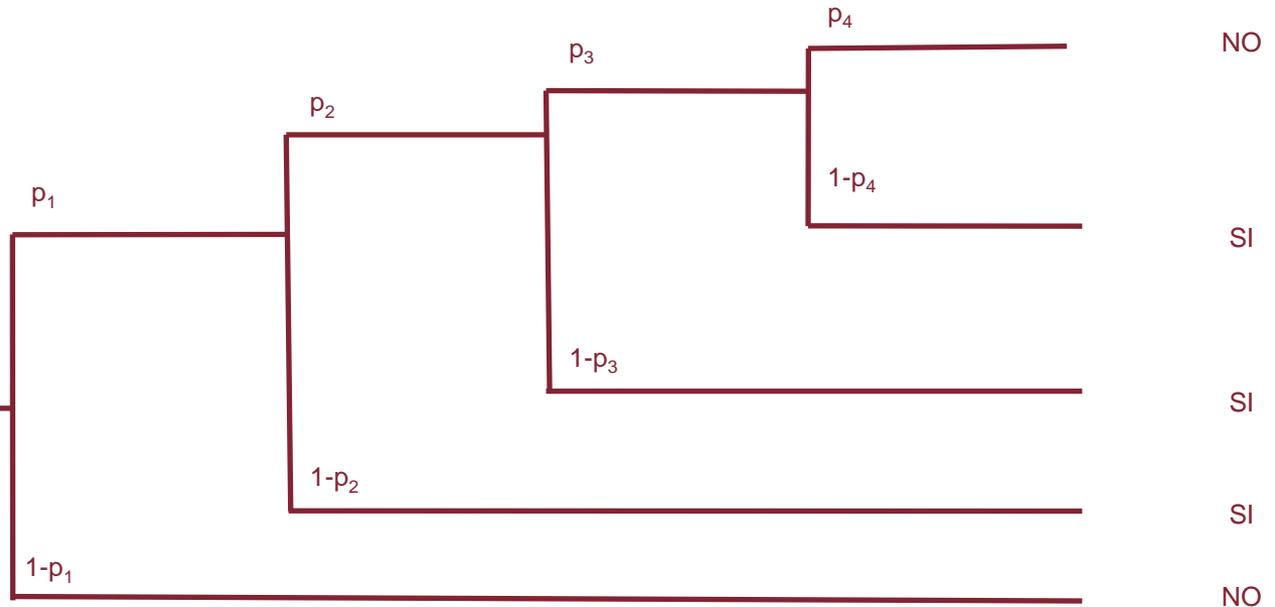
Si vuole determinare la probabilità che il lavoratore possa rimanere infortunato.

# ETA – Esempio di ET



<b>E<sub>1</sub>: FUORIUSCITA IN LUOGO PERICOLOSO</b>	<b>E<sub>2</sub>: IL RILEVATORE RILEVA IL GAS</b>	<b>E<sub>3</sub>: L'ALLARME SUONA</b>	<b>E<sub>4</sub>: IL LAVORATORE E' IN GRADO DI USCIRE</b>	<b>E<sub>5</sub>: INFORTUNIO DELLA PERSONA</b>
---	---	---------------------------------------	---	--

**E<sub>0</sub>: FUORIUSCITA DI GAS TOSSICO**

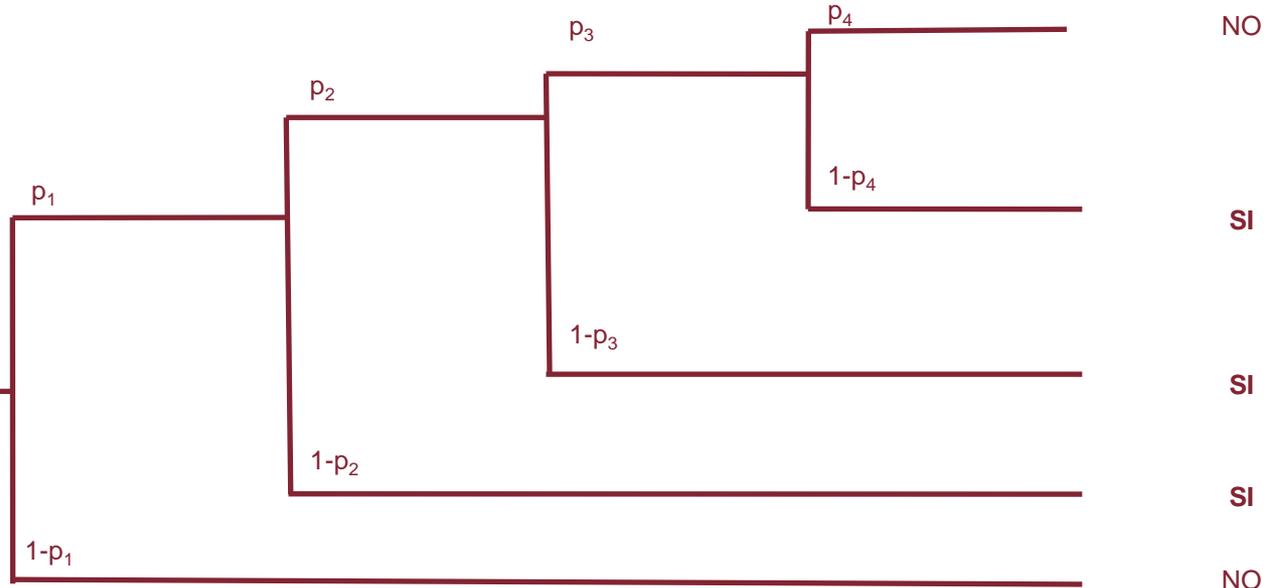


# ETA – Esempio di ET



<b>E<sub>1</sub>: FUORIUSCITA IN LUOGO PERICOLOSO</b>	<b>E<sub>2</sub>: IL RILEVATORE RILEVA IL GAS</b>	<b>E<sub>3</sub>: L'ALLARME SUONA</b>	<b>E<sub>4</sub>: IL LAVORATORE E' IN GRADO DI USCIRE</b>	<b>E<sub>5</sub>: INFORTUNIO DELLA PERSONA</b>
---	---	---------------------------------------	---	--

**E<sub>0</sub>: FUORIUSCITA DI GAS TOSSICO**



Assumendo che gli eventi siano indipendenti, la probabilità di infortunio della persona è data dalla somma delle probabilità di ciascuno scenario in cui essa si verifica:

$$p(E_5) = p_1 p_2 p_3 (1-p_4) + p_1 (1-p_2) + p_1 p_2 (1-p_3)$$