



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE
FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Corso di laurea triennale in Ingegneria Gestionale

Gli alberi di classificazione per l'analisi dei guasti.

Classification trees for failure analysis.

Relatore:

Ch.mo Prof. Maurizio Bevilacqua

Correlatore:

Ing. Sara Antomarioni

Tesi di Laurea di:
Massimo Sabbatini

Anno accademico 2019/2020

SOMMARIO

SOMMARIO	2
1. GLI ALBERI DI CLASSIFICAZIONE	4
1.1. OVERVIEW:	4
1.2. LA COSTRUZIONE DI UN ALBERO DI CLASSIFICAZIONE:	5
2. L'ANALISI DEI GUASTI	8
2.1. OVERVIEW:	8
2.2. RELIABILITY CENTERED MAINTENANCE, RCM:	8
2.2.1. Predictive Testing and Inspection, PTI:	9
2.3. SAFETY ENGINEERING:	10
3. FAILURE MODES AND EFFECTS ANALYSIS	11
3.1. OVERVIEW:	11
• FMECA:	11
3.2. IPOTESI FMEA:	12
3.3. PROCEDURA:	12
3.3.1. I passi chiave:	12
3.4. ESEMPIO:	13
4. FAULT TREE ANALYSIS	15
4.1. OVERVIEW:	15
4.2. STORIA E CAMPI DI APPLICAZIONE:	15
4.3. SIMBOLOGIA:	16
4.4. PROCEDURA FTA:	18
4.5. PASSI BASE:	18
4.6. RISULTATI:	19
4.7. ESEMPIO:	19
5. RELIABILITY BLOCK DIAGRAM, RBD	22
5.1. OVERVIEW:	22

5.2.	PROCEDURA:	22
5.2.1.	Disegnare un RBD a partire da un albero dei guasti:	24
5.3.	CALCULATING AN RBD:	25
5.3.1.	Caso Probabilistico:	25
5.3.2.	Caso Tasso d'errore:	26
5.4.	L'APPLICAZIONE DI UN DIAGRAMMA RBD:	26
6.	DIAGRAMMI DI ISHIKAWA, CED	29
6.1.	OVERVIEW:	29
6.2.	PROCEDURA:	29
6.2.1.	Passaggi chiave:	31
6.3.	DETERMINARE IL RISCHIO GLOBALE:	32
6.3.1.	Passaggi chiave nella determinazione del rischio globale:	33
6.4.	DISEGNARE UN DIAGRAMMA DI ISHIKAWA:	33
	• CED a dispersione:	34
	• CED per classificazione di processo:	35
	• CED per enumerazione delle cause:	35
6.5.	RISULTATI:	35
6.6.	UN ESEMPIO DI APPLICAZIONE DI UN CED:	36
7.	CONCLUSIONI	42
	BIBLIOGRAFIA:	45

1. GLI ALBERI DI CLASSIFICAZIONE

1.1. OVERVIEW:

La classificazione è quel processo che permette di riconoscere, comprendere e differenziare idee e oggetti sulla base di determinate caratteristiche o modalità^[1]; esistono a questo scopo svariati algoritmi di classificazione i quali permettono di individuare particolari caratteristiche e definire degli schemi ricorrenti.

Gli schemi ricorrenti di cui sopra fungono da pattern di riconoscimento per l'individuazione di classi, le quali vengono caratterizzate da particolari attributi e permettono un'associazione tra elementi diversi di un problema o di un sistema che si voglia analizzare.

Le tecniche di classificazione e le tecniche di raggruppamento o clustering differiscono sostanzialmente tra loro; nell'attività di classificazione si fa riferimento ad un attributo fondamentale, il cui numero di modalità rappresenta il numero dei gruppi, le ramificazioni, che si verranno a formare. Due elementi appartenenti al medesimo gruppo in un processo di classificazione possono essere fortemente diversi fra loro.

Nel raggruppamento invece, non vi è un numero di gruppi potenziali prefissato, essi vengono creati sulla base di tutti gli attributi presenti nel database. Ciò comporta una caratterizzazione dei gruppi sulla base di attributi "simili" e fa inoltre sì che due elementi appartenenti a gruppi diversi siano sufficientemente "distanti tra di loro" in termini di caratteristiche.

Allo scopo di classificare, particolarmente utile risulta la creazione di grafici, in forma di diagrammi di flusso, la cui funzione è quella di coadiuvare la suddetta attività, permettendo una visione chiara ed una migliore comprensione dei risultati ottenuti.

Comunemente essi vengono utilizzati in campi quali l'automazione, il machine learning, la biologia, la ricerca operativa e l'ingegneria; in particolare, nei capitoli seguenti vedremo come tali grafici vengano impiegati in quella branca dell'ingegneria che riguarda l'affidabilità, la sicurezza e la manutenibilità.

I suddetti grafici, denominati alberi di classificazione, vengono costruiti suddividendo ripetutamente gli attributi in sottoinsiemi omogenei rispetto alla variabile risposta, tale variabile è l'attributo che descrive la classe del dataset, ciò significa che di conseguenza tutti gli elementi presenti in una determinata classe possiedono delle caratteristiche pressoché identiche rispetto ad essa.

Il termine alberi di classificazione deriva dalla caratteristica struttura che assumono, somigliante ad un albero stilizzato, con “foglie” e “rami”. La creazione dell’albero viene effettuata a partire da una “cima”, ovvero un nodo base, il quale rappresenta un determinato evento o effetto, nel nostro caso generalmente indesiderato, oppure una classificazione di tipo generale, ad esempio per le specie in ambito biologico.

Ogni nodo interno descrive quindi un evento o una determinata caratteristica, mentre i “rami”, da questi uscenti o entranti, indicano possibili relazioni di causa-effetto tra eventi differenti, costi connessi, probabilità di avvenimento o potenziali divisioni in categorie^[2].

Le “foglie”, ovvero i nodi esterni, rappresentano in quest’ottica un evento non più riconducibile ad avvenimenti precedenti o una categoria non più divisibile in ulteriori sottocategorie^[3].

Di seguito viene riportato un esempio per comprendere il meccanismo con il quale si arriva alla costruzione di un albero di classificazione, nonché la struttura dell’albero stesso^[4].

1.2. LA COSTRUZIONE DI UN ALBERO DI CLASSIFICAZIONE:

Si supponga che i dati provengano da una compagnia di assicurazioni, nella quale un esperto ha assegnato ad ogni utente un livello di rischio (A=alto, B=basso), basandosi su esperienze precedenti e incidenti effettivamente avvenuti (S sta per sportivo, FA sta per familiare, AU sta per autocarro):

	ETÁ	TIPO DI AUTOVEICOLO	RISCHIO
Utente 1	17	S	A
Utente 2	43	FA	B
Utente 3	68	FA	B
Utente 4	32	AU	B
Utente 5	23	FA	A
Utente 6	18	FA	A
Utente 7	20	FA	A
Utente 8	45	S	A
Utente 9	50	AU	B
Utente 10	64	AU	A
Utente 11	46	FA	B
Utente 12	40	FA	B

Fig. 1, Tabella riportante i profili di rischio relativi a diverse situazioni.

La compagnia di assicurazioni desidera una procedura automatica che sia in grado di segnalare se un nuovo cliente può essere fonte di rischio. L'esempio rappresenta un tipico problema di classificazione che può essere risolto con la costruzione di un albero come quello presentato di seguito:

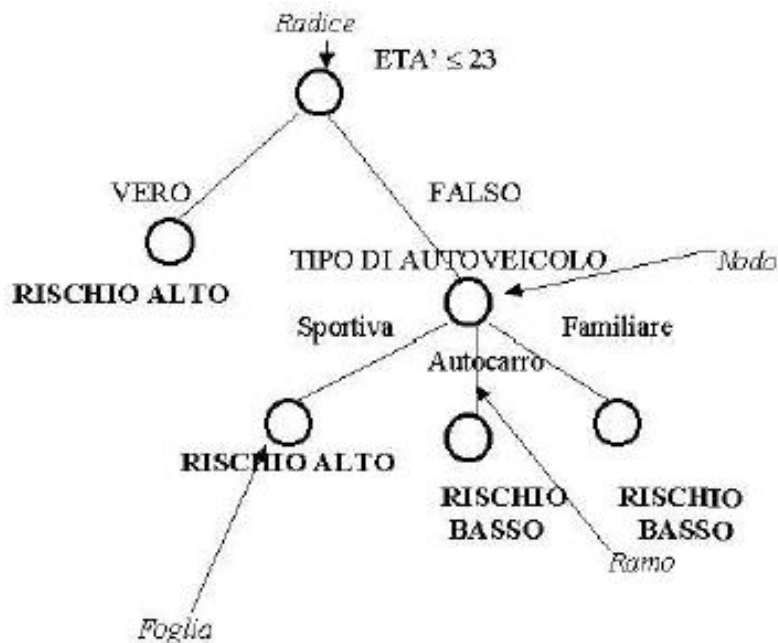


Fig. 2, Esempio di applicazione di un albero di classificazione.

L'esempio sopra riportato in **Fig. 2** mostra un albero di classificazione, i cui nodi rappresentano le combinazioni di attributi presenti, i rami i risultati dei test effettuati sui nodi mentre le foglie rappresentano il risultato della classificazione.

Poiché spesso risulta difficile presentare a persone non esperte una struttura siffatta, si preferisce utilizzare una rappresentazione equivalente ma più intuitiva, che espliciti le regole di classificazione su cui l'albero si basa.

- **Regole di classificazione:**

Gli alberi di classificazione per loro natura non sono altro che la rappresentazione grafica delle regole decisionali che ne permettono la costruzione. Ogni ramo rappresenta quindi una legge di classificazione diversa mentre i nodi esterni rappresentano il risultato finale condizionato dalla veridicità delle leggi precedenti^[5]:

“se condizione 1 e condizione 2 e allora risultato.”

Sebbene non sia possibile costruire un albero senza una conoscenza di tali leggi, è invece possibile ricavare facilmente quest'ultime dall'albero; che nel caso dell'esempio in questione, potrebbero essere espresse nel modo seguente:

- Se età ≤ 23 o il tipo di autoveicolo è sportivo (S) allora il rischio è alto;
- Se età > 23 e il tipo di autoveicolo è {familiare (FA), autocarro (AU)} allora il rischio è basso.

Risulta quindi abbastanza semplice comprendere la portata di applicazione e l'utilità di tale strumento. Vi è un'ulteriore distinzione di cui è importante discutere, gli alberi di classificazione, appunto attraverso una discriminazione sulla base di classi, effettuano il raggruppamento degli elementi considerati, queste classi sono considerabili come degli intervalli di valori discreti.

Gli alberi che vengono impiegati per predire variabili di tipo continuo sono noti in letteratura con il nome di alberi di regressione. Chiaramente esistono molte più difficoltà nel gestire dati di tipo continuo, ad iniziare dal campionamento dei dati stessi.

L'esempio presentato è abbastanza semplice, l'albero di classificazione costruito risulta facile da comprendere ed interpretare; nella realtà, la struttura di un albero di classificazione può divenire assai più complicata, soprattutto nei casi derivati da database contenenti centinaia di attributi ed una variabile fondamentale con un alto potenziale di divisione o "split", in classi.

Diverse tecniche sono state messe a punto per ridurre i tempi di calcolo, tra cui le più importanti si avvalgono di modulare l'albero riducendolo a tanti sottoalberi indipendenti e le tecniche di taglio o "pruning", che consistono nell'ottenere da un albero il più piccolo "sottoalbero", senza di fatto compromettere l'accuratezza dell'albero madre^[6]; ad esempio, un ramo o un sottoalbero che l'utilizzatore giudica irrilevante poiché possiede un numero esiguo di classi, potrebbe essere rimosso effettuando di fatto un'operazione di "potatura".

In tali situazioni, lasciar "crescere" l'albero senza stabilire un limite di qualsiasi natura può far sì che l'albero ottenuto diventi non interpretabile. Questo perché il crescere della profondità di un albero, ovvero della sua dimensione, non influisce direttamente sulla bontà del modello. Una crescita eccessiva della dimensione dell'albero potrebbe portare solo ad aumento sproporzionato della complessità computazionale ma non all'ottenimento di ulteriori benefici.

2. L'ANALISI DEI GUASTI

2.1. OVERVIEW:

L'analisi dei guasti è quel processo che inizia con la raccolta di dati e permette di determinare quale siano state le cause che hanno portato ad un malfunzionamento o ad un errore nel sistema^[7], essa può altresì essere impiegata a priori al fine di prevedere teoricamente quali saranno le conseguenze di determinati eventi o l'influenza di possibili guasti sul funzionamento dell'intero sistema.

È proprio questa capacità a rendere l'analisi dei guasti una componente fondamentale nello studio di progetti legati alle più disparate discipline, vantando impieghi in campi quali ad esempio l'ingegneria civile, la medicina, la biochimica, l'informatica e l'ingegneria aerospaziale.

Essa permette infatti, non solo di risparmiare il denaro e le risorse necessarie all'acquisto ex-novo, alle riparazioni o alla ricostruzione di strutture, dispositivi e macchinari, ma anche di salvare le vite di coloro che operano a contatto con o usufruiscono dei suddetti, diminuendo in maniera incisiva tutti i rischi connessi all'avvenimento di guasti, malfunzionamenti e incidenti di varia natura. Tipicamente, l'analisi dei guasti viene effettuata durante operazioni di RCM e ingegneria della sicurezza.

2.2. RELIABILITY CENTERED MAINTENANCE, RCM:

L'utilizzo di tecniche di analisi dei guasti è particolarmente centrale nei processi di manutenzione basati sull'affidabilità degli impianti industriali e dei macchinari; in special modo, quando queste vengono impiegate per determinare quali azioni vanno compiute, al fine di assicurarne il funzionamento sicuro e conseguentemente massimizzarne l'affidabilità. Gli interventi che ne conseguono avranno un carattere preventivo e saranno tipici dell'approccio RCM.

In un primo momento vengono identificati dei set di macchinari e strutture essenziali al buon funzionamento dell'impianto o quelle che sono le parti necessarie al funzionamento del macchinario; di questi elementi vengono in seguito raccolti tutti i dati che ne compongono la storia e possibilmente, attraverso l'impiego di banche dati o le informazioni messe a disposizione dai manutentori, fornitori e/o costruttori, vengono raccolti tutti i dati relativi ai guasti e ai malfunzionamenti, siano essi già avvenuti o potenziali^[8].

A questo punto si interviene attraverso tecniche di vario genere, quali alberi di classificazione e tecniche predittive e di ispezione (PTI).

2.2.1. Predictive Testing and Inspection, PTI:

Questo insieme di tecniche è una delle componenti fondamentali dell'approccio RCM che unisce tecniche non intrusive e di ispezione visuale ad un'ampia varietà di approcci attraverso strumentazione. I dati estrapolati dall'analisi vengono poi impiegati per determinare le condizioni delle strutture, dei macchinari o delle parti e forniscono la base per l'analisi e la comparazione di trend, così come per il riconoscimento di certi pattern di usura e degradamento.

Di seguito, sei degli approcci più diffusi^{[9],[10]}:

- **Monitoraggio e analisi delle vibrazioni:** Utile in presenza di sistemi con parti rotanti e per valutarne l'integrità strutturale. Vari fattori influenzano l'efficacia di questa tecnica che dipende dall'abilità dell'analista, dalla complessità della strumentazione, dal montaggio corretto dei sensori così come dal corretto sviluppo dei dati.
- **Monitoraggio dei parametri elettrici:** Viene effettuato il monitoraggio di parametri elettrici importanti per identificare e correggere guasti legati a problematiche elettriche, come ad esempio squilibrio di fase, rottura dell'isolamento e connessioni con resistenza molto elevata.
- **Termografie ad Infrarossi, IRT:** Vengono impiegate per ottenere dei termogrammi, fotografie delle differenze di calore, utili in special modo per attrezzature con un alto potenziale energetico o superfici molto estese come ad esempio dei muri, poiché non necessitano di contatto fisico con l'elemento sotto osservazione.
- **Analisi dei lubrificanti e delle parti esposte all'usura:** Questa tipologia di analisi ha tre obiettivi, ovviamente andare a valutare quali siano le condizioni di usura dell'attrezzatura, valutare quali siano le condizioni dei lubrificanti impiegati nonché, verificare se siano avvenute delle contaminazioni del lubrificante che porterebbe dunque ad un minore effetto lubrificante e ad una maggiore usura. Questa tecnica molto utile risulta però poco efficace in caso di ridotta accessibilità ai macchinari o test ridotti legati a considerazioni di tipo economico.
- **Ultrasuoni passivi, AVD:** Tale tipologia di test sfrutta il passaggio di ultrasuoni attraverso il materiale in esame, la frequenza emessa varia tra i 20 e i 100 kHz ma viene modulata così da essere percepibile; il passaggio attraverso parti usurate, male allocate o soggette a

perdite causa una modificazione nel suono udibile. L'efficacia di questa tecnica è limitata in gran parte dalla soggettività del metodo e dipende dalla capacità di percepire differenze di suono dell'analista.

- **Test Non Distruttivi, NDT:** Queste tecniche vengono applicate ove sia inefficace o troppo costoso applicare tecniche di tipo distruttivo o che potrebbero andare a danneggiare i materiali o la parte. Si usa principalmente per prodotti o parti dall'elevato valore e al fine di comprendere la qualità dell'oggetto e le proprietà del materiale. Prima di essere implementata tale metodologia richiede lo sviluppo di un piano accurato che identifichi accuratamente dove allocare i punti da campionare e gli intervalli tra un campionamento e l'altro, così come le modalità d'errore che ogni campionamento permette di analizzare.

Particolarmente utile dove si verificano gomiti e cambiamenti nel diametro di tubazioni, ove presenti saldature ed aree sensibili alla cavitazione e alla corrosione.

2.3. SAFETY ENGINEERING:

La safety engineering è quella branca dell'ingegneria che si occupa della sicurezza dei sistemi ingegnerizzati, nello specifico che essi rispettino sempre un certo standard, stabilito dalla legge, garantito primariamente dai produttori dei macchinari e/o dai costruttori delle strutture nel caso in cui si usufruisca di essi o esse^[11]. Le tecniche d'analisi hanno come obiettivo la ricerca della dipendenza tra guasti a livello del singolo componente ed il pericolo a livello generale del sistema.

Queste possono essere suddivise in due tipologie, tecniche di tipo quantitativo, il cui obiettivo è l'analisi del sistema al fine di produrre un risultato numerico che possa stimare le probabilità e i tassi di incidenza e/o la gravità delle conseguenze di un certo evento.

E tecniche di tipo qualitativo, il cui impiego è invece finalizzato a ricercare quali possano essere gli eventi che debbono verificarsi, affinché si venga a creare un determinato tipo di pericolo a livello sistemico^[12].

Metodi tradizionali impiegati per valutare il livello di sicurezza di un certo sistema sono l'analisi dell'albero dei guasti o FTA, e l'analisi delle modalità d'errore e dei loro effetti o FMEA.

3. FAILURE MODES AND EFFECTS ANALYSIS

3.1. OVERVIEW:

Per la prima volta, il metodo FMEA venne descritto in un documento, il MIL-P-1629^[13], prodotto nel 1949 dal dipartimento per lo sviluppo di procedure militari dello US Armed Forces; lo scopo di tale metodo era la valutazione, dal punto di vista dell'affidabilità, del design di progettazione dei sistemi di controllo di volo degli aerei militari allora in dotazione^[14].

Da allora, la FMEA è divenuta uno degli strumenti alla base di quelle branche dell'ingegneria che si occupano di qualità, sicurezza ed affidabilità. L'applicazione di questa tecnica prevede l'impiego di una logica di tipo induttivo, si procede quindi da singoli casi individuabili verso una legge generale, che è appunto il verificarsi di guasti o il completo shutdown del sistema.

La procedura prende in considerazione in maniera sistematica e rigorosa tutte le possibili modalità di guasto che potrebbero colpire i singoli elementi individualmente. Gli effetti di ognuna di queste modalità di guasto sull'elemento in considerazione e sull'intero sistema vengono identificati e registrati^[15].

Affinché queste attività vengano svolte accuratamente, è essenziale che l'analisi sia condotta da team con un ridotto numero di componenti, al fine di garantire al meglio il coordinamento delle operazioni, i cui membri dovrebbero avere una conoscenza approfondita delle apparecchiature e del sistema, comprese la sua storia operativa e le modalità di guasto.

Per ciascun componente, le modalità di errore e i relativi effetti sul resto del sistema sono registrati in un foglio di lavoro FMEA specifico. Esistono numerose varianti di tali fogli di lavoro

- **FMECA:**

Il metodo FMECA estende la procedura FMEA includendo nell'analisi anche valutazioni riguardanti la frequenza con cui avviene una determinata modalità di guasto e la criticità di queste e dei loro effetti.

Tale criticità viene definita sulla base della gravità delle conseguenze del guasto a livello sistemico, cioè a seconda di quanto l'effetto del guasto incida sul corretto funzionamento del sistema^[16].

3.2. IPOTESI FMEA:

La procedura, per essere correttamente svolta, necessita della presenza di alcune condizioni di base, le seguenti sono solo alcune delle possibili ipotesi:

- Esiste solo una modalità di errore alla volta.
- Tutti gli input, compresi i comandi inseriti tramite software, per l'oggetto da analizzare, sono presenti e ai valori nominali.
- Tutte le risorse necessarie al funzionamento del sistema, quali ad esempio materie prime da lavorare, combustibili e corrente elettrica, sono presenti in quantità sufficienti.

Va inoltre notato che qualora fosse necessario le ipotesi possono essere aggiornate o è possibile aggiungerne di ulteriori. All'analisi va inoltre associato un documento sul quale vanno annotati quali sono gli elementi che sono stati considerati dalla procedura e quali sono stati invece esclusi, motivandone inoltre l'esclusione^[17].

3.3. PROCEDURA:

La FMEA è un metodo molto efficace ma che richiede tempo per l'identificazione dei pericoli.

Prende in considerazione un elemento del sistema, di solito un componente hardware, e mira a esaminare ogni possibile modalità di guasto di esso e di ogni componente al suo interno.

Per ogni modalità di errore vanno determinate le conseguenze, intese come gli effetti che questo ha sul sistema, così da poter decidere l'adeguatezza della risposta al guasto. Inizialmente viene definito il confine per lo studio, inteso come un limite fisico, generalmente rappresentato dai limiti dell'attrezzatura che si sta analizzando, qualsiasi interfaccia con il resto del sistema va identificata e analizzata.

In seguito, viene fissata la profondità dell'analisi che si vuole compiere e quindi va ottenuta tutta la documentazione necessaria, questa si compone di qualsiasi documento attesti lo stato attuale del sistema, disegni, manuali, registri delle manutenzioni effettuate e dei guasti precedentemente avvenuti^{[18], [19], [20]}:

3.3.1. I passi chiave:

I passi chiave di un'analisi FMEA sono i seguenti^{[21], [22], [23]}:

- a) Definire i limiti del sistema, attrezzatura, articolo ed i requisiti di funzionamento associati dettagliati;
- b) Elencare tutti i componenti e sottosistemi dei suddetti;
- c) Identificare ciascun componente, le relative modalità di errore associate e le relative descrizioni;
- d) Assegnare le probabilità di guasto a ciascuna modalità di guasto dei componenti identificati;
- e) Elencare gli effetti di ciascuna modalità di guasto sul sottosistema o sull'impianto;
- f) Immettere le osservazioni per ciascuna modalità di errore nella carta FMEA;
- g) Rivedere ciascuna modalità di guasto che venga valutata come critica e avviare le misure correttive appropriate.

Se svolta correttamente, ci permette di identificare quali siano i requisiti e gli eventuali effetti, che apportare un cambiamento alla struttura del progetto genererebbe o richiederebbe; evitando possibili guasti o criticità sistemiche.

3.4. ESEMPIO:

Si procede ora con il mostrare un esempio di applicazione della tecnica FMEA, tratto da ^[24], in un serbatoio di stoccaggio di liquido, funzionante a pressione atmosferica, la misurazione del livello viene effettuata tramite l'utilizzo di un galleggiante il quale si trova situato in un tubo a guida verticale, perforato ogni 0,5 m.

La posizione del galleggiante viene rilevata acusticamente ed un segnale viene inviato al centro di controllo. Varianti includeranno la misurazione mediante memorizzazione di nastro o filo su bobina. Il rivelatore è stato sigillato a pressione atmosferica.

Ci sono solo quattro componenti:

- il galleggiante all'interno del tubo guida (follower);
- il tubo guida (guide tube);
- il rivelatore acustico (acoustic detector);
- il trasmettitore al centro di controllo (signal transmitter);

L'esempio, tratto da un evento reale, prevede che la perforazione del tubo guida sia rimasta incompleta. La parte superiore non è stata perforata, con conseguente fuoriuscita dal serbatoio.

FMEA for a float level measurement.

A	B	C	D	E	F	G	H	I
Component	Failure Mode	Effect	Safeguards	Failure Nature	Cause	Frequency	Criticality Category	Action
1 Follower	Sticks in guide tube Unrevealed	Level not detected Tank overflow or low level	Non	Danger	1 Rust in guide tube 2 Too tight fit of follower in tube	Unknown	High	1.1 Devise a credible test procedure 1.2 Fit a diverse level measurement 1.3 Check the installation as fitted for clearances 1.4 Check for weld protrusions and burrs in tube 1.5 Ideally use drawn piping
2 Follower	Is holed and sinks Unrevealed	Indicates low level when the tank may be overflowing	Non see actions above	Danger	Holed by corrosion or wear	Unknown	High	2.1 As above 2.2 Review materials of construction
3 Follower	Reaches the top of the perforations in the guide tube Degraded	Level does not appear to change as the gas is compressed into a dead pocket Tank overflows	Non	Danger	Incomplete perforating of guide tube	Unknown	High	3.1 Inspect the guide tube when fitted in place Treat the perforations as a high priority This might also be identified during a HAZOP
4 Guide tube	Perforation incomplete Degraded	As above	As above	As above	As above	As above	As above	As above
5 Guide tube	Corrosion Degraded	Level not detected Process upset	Non	Danger	Follower jams in corrosion products	Unknown	High	See 2.2
6 Acoustic detector	Wear and tear Degraded, unrevealed	Level not detected Tank overflows or process upset	Non	Danger	Level goes 'blind'	Unknown	High	See 1.1 and 1.2
7 Acoustic detector	Damaged due to impact Degraded, unrevealed	Tank overflows or process upset	Non	Danger	As above	Unknown	High	7.1 review physical protection to detector. Should it be fitted into a protective box
8 Acoustic detector	Damaged power supply	Tank overflows or process upset	Non	Danger	Level goes 'blind'	Unknown	High	8.1 review physical protection to power supply and also reliability of supply
9 Signal transmitter	As above	As above	Non	Danger	As above	Unknown	High	9.1 See 7.1 and apply to transmitter 9.2 See 8.1 and apply to transmitter

Fig. 3, Carta FMEA di un sistema serbatoio con misurazione di livello tramite galleggiante.

L'analisi ha prodotto la risposta corretta seppure a priori una tale modalità di guasto avrebbe generato domande poiché il tubo guida per sua natura viene montato a seguito del perforamento. Le azioni 1.1, 1.2, 1.3, 1.4, 1.5, 7.1, 8.1, 9.1 e 9.2 sono tutte buone pratiche.

*- HAZOP, Hazard and Operability study.

4. FAULT TREE ANALYSIS

4.1. OVERVIEW:

Un sistema è formato da un insieme di componenti, uniti da un'architettura definita, il cui unico scopo è adempiere alla funzione del sistema.

La probabilità di guasto funzionale della suddetta è determinata dall'integrità dei componenti costituenti e dalla logica dell'architettura dei sistemi.

Maggiore è la complessità del Sistema, maggiore diviene la necessità di una tecnica di analisi approfondita per identificare tutte le possibili combinazioni di guasti che potrebbero comportare la perdita dell'integrità del sistema.

Un albero dei guasti mostra graficamente, mediante una notazione specificata, la relazione logica tra un determinato errore del sistema e tutte le cause che vi contribuiscono.

La FTA segue una logica di tipo deduttivo, partendo quindi da un effetto indesiderato, rilevato a livello sistemico e andando ad analizzare, attraverso l'impiego di logica Booleana, via via le cause che l'hanno generato.

Le cause con impatto maggiore in termini di gravità e criticità per il sistema, richiedono a volte un'analisi FTA a sé stante. Queste condizioni di guasto del sistema e la loro classificazione sono spesso determinate in precedenza nell'analisi dei pericoli funzionali.

4.2. STORIA E CAMPI DI APPLICAZIONE:

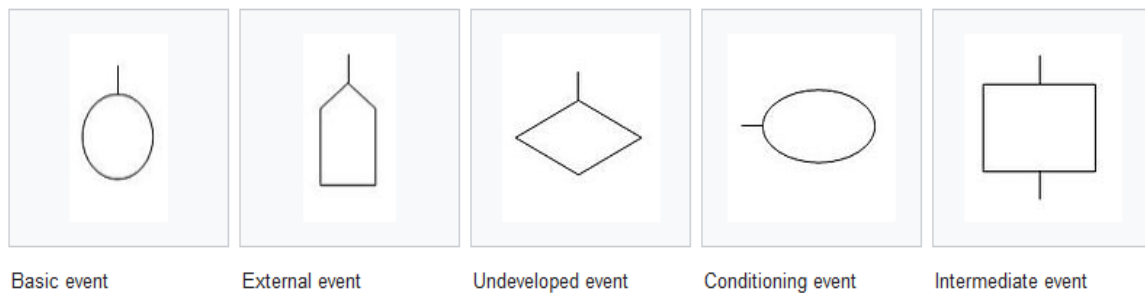
L'analisi dell'albero dei guasti o fault tree analysis, FTA, venne originariamente sviluppata nel 1962 presso i laboratori Bell da H.A. Watson , per conto della U.S. Air Force Ballistics Systems Division; allo scopo di valutare il sistema di lancio e controllo del Minuteman I Intercontinental Ballistic Missile, ICBM^{[25],[26],[27]}.

Il metodo ha da allora guadagnato ampio favore e viene principalmente usato in ambiti quale l'ingegneria della sicurezza e dell'affidabilità; al fine di comprendere quali siano le cause che portano al guasto di un sistema, come ridurre al meglio i rischi connessi con tali guasti e determinare, o perlomeno farsi un'idea, dei tassi di incidenza di guasti e malfunzionamenti che coinvolgono la sicurezza del sistema o la sua integrità funzionale.

Alcuni dei campi d'applicazione includono, ma non si limitano a, le industrie aerospaziale, chimica, di processo, nucleare, farmaceutica, petrolchimica; la FTA è inoltre impiegata in campi quali l'identificazione dei fattori di rischio relativi al fallimento dei servizi sociali, nell'ingegneria informatica per debuggare i software ed è strettamente legata all'identificazione di errori umani nello svolgimento di incarichi di manutenzione^{[28],[29],[30],[31],[32],[33]}.

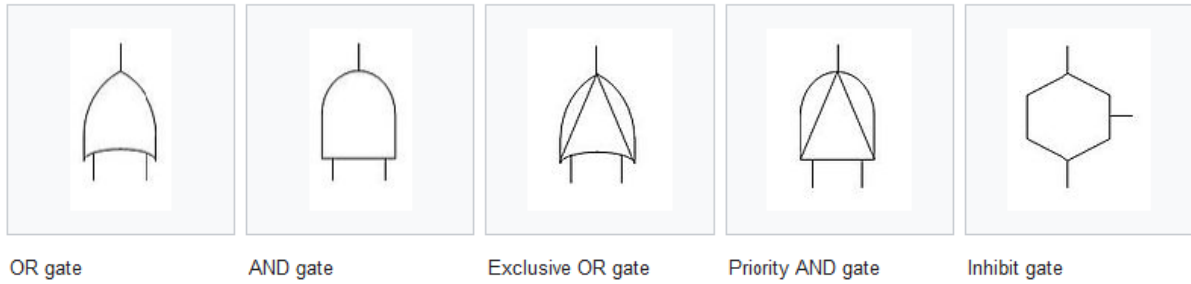
4.3. SIMBOLOGIA:

L'analisi FTA inizia con la determinazione di un evento indesiderato chiamato Top event o evento principale, in seguito tutti gli eventi che ad esso possono essere collegati, direttamente o indirettamente vengono individuati e classificati come segue^[34]:



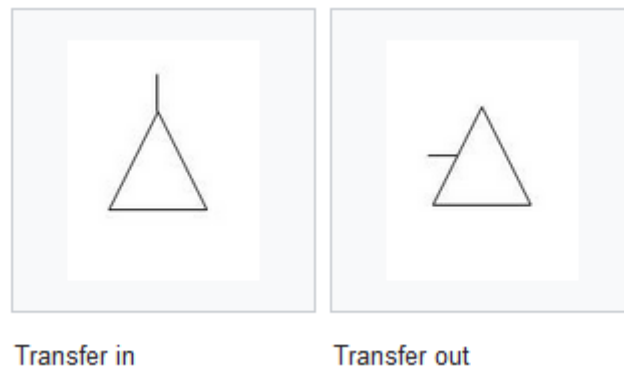
- **Basic event:** rappresenta un guasto o un errore in un componente o elemento del sistema;
- **External event:** non rappresenta di per sé un errore, normalmente previsto;
- **Undeveloped event:** un evento per il quale non sono disponibili informazioni sufficienti o che non ha alcuna conseguenza;
- **Intermediate event:** evento intermedio, a volte utilizzato per meglio descrivere un evento di importanza maggiore;
- **Conditioning event:** un evento che limita o influenza le porte logiche (gates);

Una volta classificati tutti gli eventi nelle suddette categorie, questi vengono collegati tra loro per mezzo di porte logiche o gate, come descritto nella pagina seguente.



- **OR gate:** l'uscita si verifica se si verifica un qualsiasi input;
- **AND gate:** l'uscita si verifica solo se si verificano tutti gli ingressi (siano essi dipendenti o indipendenti);
- **OR gate esclusivo:** l'uscita si verifica se si verifica esattamente un ingresso;
- **AND gate prioritario:** l'uscita si verifica se gli ingressi si verificano in una precisa sequenza specificata da un evento che funge da condizione;
- **Inhibit gate:** l'uscita si verifica se l'ingresso sotto un evento che funge da condizione abilitante.

Esiste una ulteriore coppia di simboli il cui scopo è permettere la connessione di alberi differenti, per questioni di comodità o poiché presentano delle modalità di guasto in comune:



- **Transfer in:** l'albero è connesso ad una sottostruttura;
- **Transfer out:** l'albero si connette ad un albero di livello superiore.

4.4. PROCEDURA FTA:

Come suddetto, l'analisi dell'albero dei Guasti inizia con l'individuazione di un evento indesiderato che svolge la funzione di "radice" o evento principale. Tale evento è l'effetto di cause, ulteriori eventi, verificatisi in precedenza. Tali eventi vanno in quanto tali ricercati, identificati e connessi all'evento "radice" attraverso i nessi logici descritti in precedenza.

È importante specificare che la porta OR fornisce risposta vera, cioè un guasto o un malfunzionamento, anche se uno solo degli eventi-causa connessi ad essa risulta verificarsi. Per contro, la porta logica AND fornisce risposta positiva, cioè un guasto o un malfunzionamento, solo se tutti gli eventi-causa ad essa connessi si verificano.

La costruzione dell'albero dei guasti procede in seguito all'identificazione di eventi di guasto fino a quando non risulti più necessario approfondire, ciò poiché non vi siano più ulteriori eventi o si incontrino i limiti fisici o di interesse dell'analisi stessa.

Gli eventi finora delineati vengono classificati come descritto in precedenza e si definisce albero dei guasti la struttura logica che collega la "radice", l'evento principale, alle "foglie", gli eventi base.

4.5. PASSI BASE:

Lo sviluppo o la costruzione di un albero dei guasti è un processo top-down (si inizia cioè a partire dall'evento in alto spostandosi verso il basso), esso consiste nel porsi in successione la domanda "Com'è potuto accadere questo evento?".

I passi chiave di un'analisi FTA sono i seguenti^[35]:

- Definire fattori come i presupposti di sistema e ciò che costituisce un errore;
- Sviluppare un diagramma a blocchi che mostri elementi come interfacce, input e output;
- Identificare l'evento indesiderato principale, la "radice";
- Utilizzando i simboli presentati sopra, evidenziare tutte le cause che possono portare al verificarsi dell'evento principale;
- Costruire l'albero dei guasti fino al livello più basso richiesto;
- Analizzare l'albero dei guasti secondo quanto richiesto;

- Identificare le misure correttive necessarie;
- Documentare e dare seguito alle misure correttive evidenziate.

4.6. RISULTATI:

Se effettuata correttamente, la FTA permette di comprendere quale sia la logica che guida l'accadere di determinati eventi verso un effetto indesiderato di proporzioni assai maggiori, di mantenere il sistema in conformità ai requisiti di affidabilità e sicurezza, prioritizzare la manutenzione ed il controllo di alcune delle componenti del sistema che si dimostrano essere critiche per il mantenimento del suo corretto funzionamento.

Di conseguenza, la FTA permette anche di ottimizzare o minimizzare l'impiego di risorse, nonché i costi connessi con la ricostruzione, la manutenzione o l'acquisto ex-novo di elementi del sistema, così come può essere impiegato anche a priori per coadiuvare la progettazione o l'ampliamento di un sistema.

Infine, l'analisi dell'albero dei guasti permette anche valutazioni di tipo probabilistico mirate a determinare le prestazioni che un determinato sistema presenta in caso di guasto o malfunzionamento di una certa componente.

4.7. ESEMPIO:

Si procede con l'illustrazione di un esempio di applicazione dell'analisi FTA^[36]: Una stanza ha due lampadine e un interruttore, si supponga che:

- La stanza non possieda finestre;
- Il circuito dell'interruttore possa non chiudersi;
- La stanza si oscuri solo se:
 - .1. non vi è elettricità,
 - .2. entrambe le lampadine si fulminano
 - .3. l'interruttore non si chiude.

Si voglia determinare l'albero dei guasti che colleghi le cause sopra indicate all'effetto indesiderato ovvero che la stanza non sia illuminata (vedi **Fig. 2**):

Esaminando le ipotesi, è possibile individuare tre differenti sottosistemi che potrebbero determinare la mancanza di illuminazione nella stanza (evento indesiderato, E8):

Si prenda in considerazione il primo e più semplice di essi, l'interruttore non funziona adeguatamente, non chiudendo il circuito, la corrente non raggiunge le lampadine che quindi non si accendono (evento E5).

Il secondo sottosistema (E7) viene generato dal verificarsi del guasto di entrambe le lampadine nel medesimo istante, tali eventi base (i singoli guasti, E3, E4) saranno dunque collegati assieme da una porta AND poiché risultano necessari entrambi.

Il terzo ed ultimo, si deve alla possibilità che vi sia mancanza di elettricità (E6), tale mancanza può allora verificarsi in due occasioni, in caso di guasto al sistema elettrico (E1) o in caso di cortocircuito/sovraccarico (E2).

Si procede con il calcolare la probabilità che tale evento indesiderato possa avvenire, come descritto in precedenza, l'albero mette in relazione gli eventi secondo logica Booleana, in quest'ottica, la probabilità che una porta AND fornisca risposta vera, viene data dalla seguente equazione^[37]:

$$P(E_{AND}) = \prod_{i=1}^n P(E_i)$$

Mentre la probabilità che una porta OR fornisca risposta vera, ci viene invece data dalla seguente equazione^[38]:

$$P(E_{OR}) = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - P(E_i)]$$

Associando agli eventi le probabilità di accadere come segue: E1, E2, E3, E4, ed E5, rispettivamente 0.04, 0.05, 0.06, 0.07, and 0.08; otterremo:

$$P(E5) = 0.08;$$

Ovvero, vi è una probabilità dell'8% che premendo l'interruttore, esso non svolga bene la sua funzione e perciò non chiuda il circuito. Analizzando il sottosistema caratterizzato da E6 si ottiene:

$$P(E6) = 1 - (1 - 0.04)(1 - 0.05) = 0.088;$$

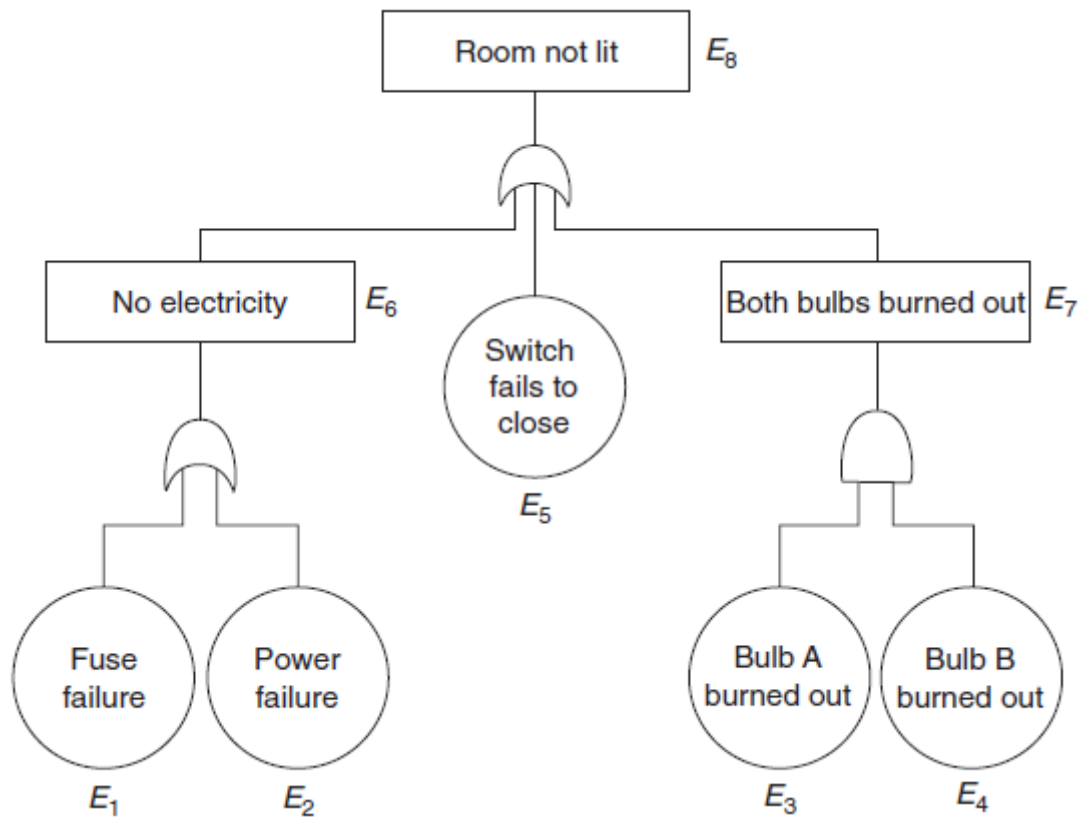


Fig. 4, Albero dei guasti per il problema citato.

Ovvero, vi è una probabilità dell'8,8% che non vi sia elettricità quando si preme l'interruttore, ciò avviene a causa degli eventi base E1 ed E2. Analizzando l'ultimo sottosistema, E7, si ottiene:

$$P(E7) = 0.06 \times 0.07 = 0.0042;$$

Ovvero, vi è una probabilità dell'0,42% che entrambe le lampadine siano guaste al momento dell'accensione. Arrivati a questo punto, risulta infine possibile calcolare la probabilità che avvenga l'evento indesiderato, ovvero che la stanza non si illumini:

$$P(E8) = 1 - (1 - 0.08)(1 - 0.088)(1 - 0.0042) = 0.1645.$$

Come è possibile notare, date le ipotesi di partenza, vi è una probabilità del 16,45% che la stanza non si illumini.

5. RELIABILITY BLOCK DIAGRAM, RBD

5.1. OVERVIEW:

Un diagramma a blocchi per l'affidabilità o reliability block diagram, è un metodo schematico che permette di mostrare in quale modo l'affidabilità dei componenti contribuisce al successo o al fallimento di un sistema.

Gli RBD vengono talvolta definiti con il nome di diagrammi di dipendenza, DD, poiché appunto mostrano la correlazione tra l'affidabilità dei singoli elementi e l'affidabilità dell'intero sistema

Un RBD viene disegnato appunto attraverso una serie di blocchi, questi vengono collegati in parallelo o in serie a seconda del tipo di relazione che intercorre tra gli eventi collegati. I blocchi posti in parallelo indicano dei sottosistemi o delle componenti ridondanti, che contribuiscono a ridurre il tasso di errore.

In ingegneria, il termine ridondanza indica la duplicazione di componenti o funzioni critiche di un sistema con l'intenzione di aumentarne l'affidabilità. generalmente ciò avviene per mezzo di meccanismi di backup o fail-safe^[39]; in quest'ultimo caso, il design del sistema viene ideato in maniera tale che se anche un guasto dovesse avvenire, il sistema rimane complessivamente sicuro come prima che il o i guasti avvenissero^{[40],[41]}.

5.2. PROCEDURA:

Ogni blocco rappresenta un componente del sistema e possiede un tasso di errore, failure rate (λ), ed una probabilità di guasto associati (vedi **Fig. 3**). In un RBD, sottosistemi con elementi ridondanti verranno indicati tramite blocchi posti in parallelo^[42].

Un esempio pratico di tale situazione potrebbe essere rappresentato da una stanza con illuminazione proveniente da tre lampadine, il fallimento in parallelo di sole due non porterebbe ad un completo blackout.

Al contrario, un sottosistema con ridondanza nulla verrebbe rappresentato da dei blocchi posti in serie, questa disposizione ne rispecchia l'affidabilità poiché infatti se un guasto dovesse venire a verificarsi, l'intero sottosistema ne sperimenterebbe le conseguenze.

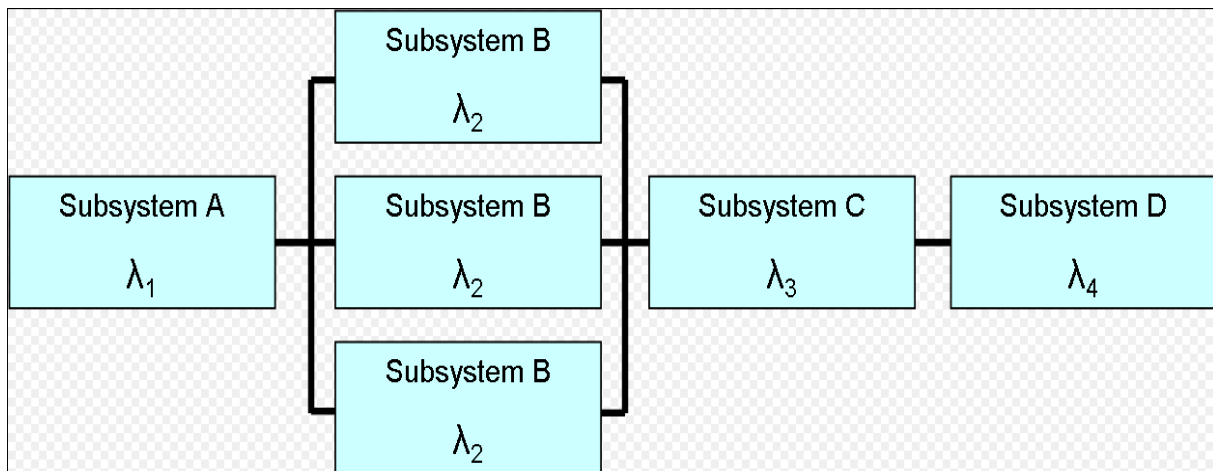


Fig. 5, Esempio di RBD con tassi di errore.

Si prenda ad esempio in considerazione una mancanza di energia elettrica dovuta ad un cortocircuito, tale mancanza influenzerebbe l'intero sistema illuminazione nonostante il corretto funzionamento di lampadine e interruttore^{[43],[44]}.

Un RBD può altresì essere rappresentato per mezzo di interruttori, switches, al posto dei blocchi; un interruttore chiuso rappresenta in questo caso un componente funzionante mentre un interruttore aperto rappresenta invece un componente guasto.

Il sistema viene perciò definito funzionante solo se risulti possibile individuare un percorso attraverso la rete di switch dall'inizio alla fine.

Facendo un passo indietro, esiste un'altra metodologia che permette di associare al sistema un diagramma a flusso, l'analisi dell'albero dei guasti. Brevemente riassumendo, la tecnica FTA mette in relazione eventi di guasto o malfunzionamento con l'integrità funzionale del sistema e ne valuta di conseguenza la sicurezza e l'affidabilità.

Gli eventi il cui verificarsi individuale non mette a repentaglio il funzionamento del sistema, vengono uniti attraverso la porta logica AND, viceversa, gli eventi il cui verificarsi implica una minaccia per il sistema, vengono invece uniti attraverso porte logiche OR, a dimostrare che anche l'accadere di uno solo di tali eventi è condizione sufficiente ad un guasto sistemico.

Viene dunque spontaneo chiedersi se non sia possibile sviluppare il grafico di una dall'altra e quali siano le regole alla base di tale processo; tali argomenti vengono trattati nel prossimo paragrafo.

5.2.1. Disegnare un RBD a partire da un albero dei guasti:

Sette sono le regole che permettono l'associazione di un diagramma RBD ad un albero FTA:

1. Ogni porta logica OR appartenente al grafico FTA va associata ad un blocco in Serie nell'RBD equivalente;
2. Ogni porta logica AND appartenente al grafico FTA va associata ad un blocco in Parallelo nell'RBD equivalente;
3. Iniziare dall'evento principale, la "cima" dell'albero dei guasti;
4. Includere nella modellazione RBD solo gli eventi base dell'FTA;
5. L'ordine con cui si convertono e inseriscono i sottosistemi, i "sottoalberi", all'interno dell'RBD è indifferente;
6. Ricercare le vere "root causes" alla base degli eventi (vedi capitolo 6.);
7. Sia l'RBD sia l'FTA sono tecniche di modellazione basate sui diagrammi di flusso, che analizzano la possibilità e la causa d'incidenza del rischio piuttosto che la sua portata e gravità.

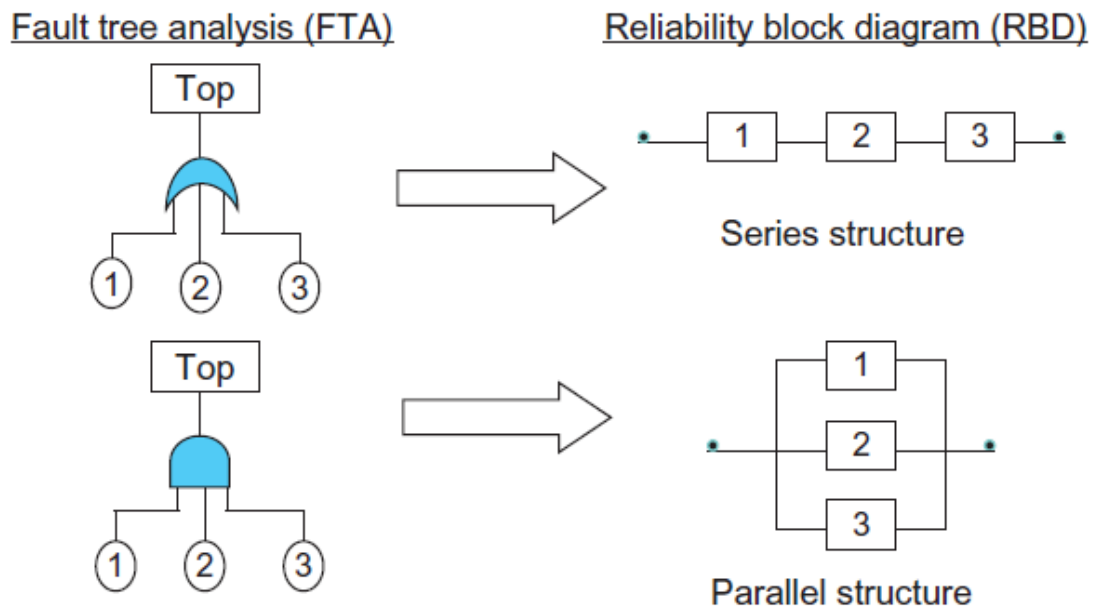


Fig. 6, Esempio di conversione FTA in RBD.

5.3. CALCULATING AN RBD:

La prima cosa da determinare quando si vuole calcolare un RBD, è se si voglia effettuare i calcoli attraverso l'uso delle probabilità dei guasti o dei tassi di errore; generalmente sono propri questi ultimi ad essere utilizzati, ad ogni modo probabilità e tassi non possono essere adoperati insieme.

Il tasso d'errore è un valore determinato per mezzo di un rapporto, al numeratore si pongono il numero di guasti registrati in un certo insieme di elementi che funge da popolazione, al denominatore viene invece posto il tempo in cui i dati vengono registrati.

Il tasso d'errore può quindi assumere valori anche superiori all'unità e proprio per questa caratteristica differisce dalla probabilità che si verifichi un guasto, tale probabilità è inoltre indicativa del numero di eventi di guasto riportati in un certo insieme campione di elementi presi in considerazione e non necessariamente dipende dal tempo di osservazione.

5.3.1. Caso Probabilistico:

A livello probabilistico il sistema si trova o in stato di guasto o malfunzionamento (F_{SYS}), o in stato di corretto funzionamento (R_{SYS}), tale situazione si può descrivere come segue:

$$R_{SYS} + F_{SYS} = 1$$

Allora, per quanto detto in precedenza, una porta AND o equivalentemente, una struttura con n blocchi in Parallelo, possiede probabilità di guasto, F_{SYS} (vedi capitolo 4.7):

$$F_{SYS} = F_1 \times F_2 \times \dots \times F_n = F_{AND} = \prod_{i=1}^n F(E_i)$$

Poiché si ha la necessità di avere tutti i componenti ridondanti guastati o comunque tutte le cause che si verifichino assieme. L'affidabilità del sistema diviene dunque:

$$R_{SYS} = R_{AND} = 1 - F_{SYS} = 1 - \prod_{i=1}^n P(E_i)$$

Quando invece si calcola l'affidabilità di una porta OR, blocchi in Serie, si ottiene un'equazione simile a quella per la probabilità di guasto di una porta AND (vedi capitolo 4.7):

$$R_{SYS} = R_{OR} = R_1 \times R_2 \times \dots \times R_n = 1 - F_{SYS} = \prod_{i=1}^n [1 - P(E_i)]$$

Dove:

$$F_{SYS} = F_{OR} = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - P(E_i)]$$

5.3.2. Caso Tasso d'errore:

Si procede ora a valutare come calcolare un RBD prendendo in considerazione i tassi d'errore^[45], λ . In caso questi siano costanti, il tasso d'errore per blocchi in serie viene calcolato attraverso l'applicazione dei processi di Poisson:

$$\lambda_{SYS} = \lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_n$$

Mentre quello per blocchi in parallelo può essere calcolato attraverso diverse formule, inclusa la seguente, che prende in considerazione tutte le componenti attive del sistema, con almeno $(n-q)$ unità con tassi d'errore eguali e il tasso di riparazioni è assai maggiore del tasso d'errore, $\mu \gg \lambda$:

$$\lambda_{SYS} = \frac{n! \lambda^{q+1}}{(n-q-1)! \mu^q}$$

Se le componenti in parallelo hanno invece tutte tasso d'errore differente, si può applicare una formula più generale; bisogna notare che se il sistema presenta la possibilità d'essere riparato, la probabilità di guasto è tale che $F = \frac{\lambda}{\mu}$, fin quando $\mu \gg \lambda$.

$$\lambda_{SYS} = \sum_{i=1}^n (\lambda_i \prod_{j=1, j \neq i}^n Q_j)$$

Si procede ad analizzare un esempio.

5.4. L'APPLICAZIONE DI UN DIAGRAMMA RBD:

Si illustra di seguito come impostare un diagramma RBD a partire da un albero FTA e come calcolare la probabilità che tale evento accada^[46]. Si valuti come esempio il caso sfortunato di un'automobile che si schianta contro un muro.

La prima cosa da fare è identificare tutte le categorie di fattori che possono causare un incidente d'auto. In questo caso, i fattori scelti erano correlati alle condizioni del conducente, della strada,

del tempo e del veicolo, ciascuno di essi è stato quindi suddiviso in ulteriori eventi legati da relazioni causa-effetto.

Ad esempio, per quanto riguarda il tempo, sia la pioggia che la scarsa visibilità possono insieme contribuire all'incidente ma singolarmente non sarebbero sufficienti, da qui, la decisione di impiegare un AND-gate.

Al contrario, per quanto riguarda le condizioni del veicolo, si potrebbe sostenere che se il pneumatico è forato o avviene un guasto meccanico, entrambi sarebbero eventi sufficienti a causare l'incidente, e quindi a quel punto, l'uso di un OR-gate.

Ovviamente, gli eventi di base potrebbero essere ulteriormente ampliati in sottocategorie ma si supponga di non procedere oltre, la **Fig. 5** riassume quanto detto attraverso un albero dei guasti, tecnica FTA:

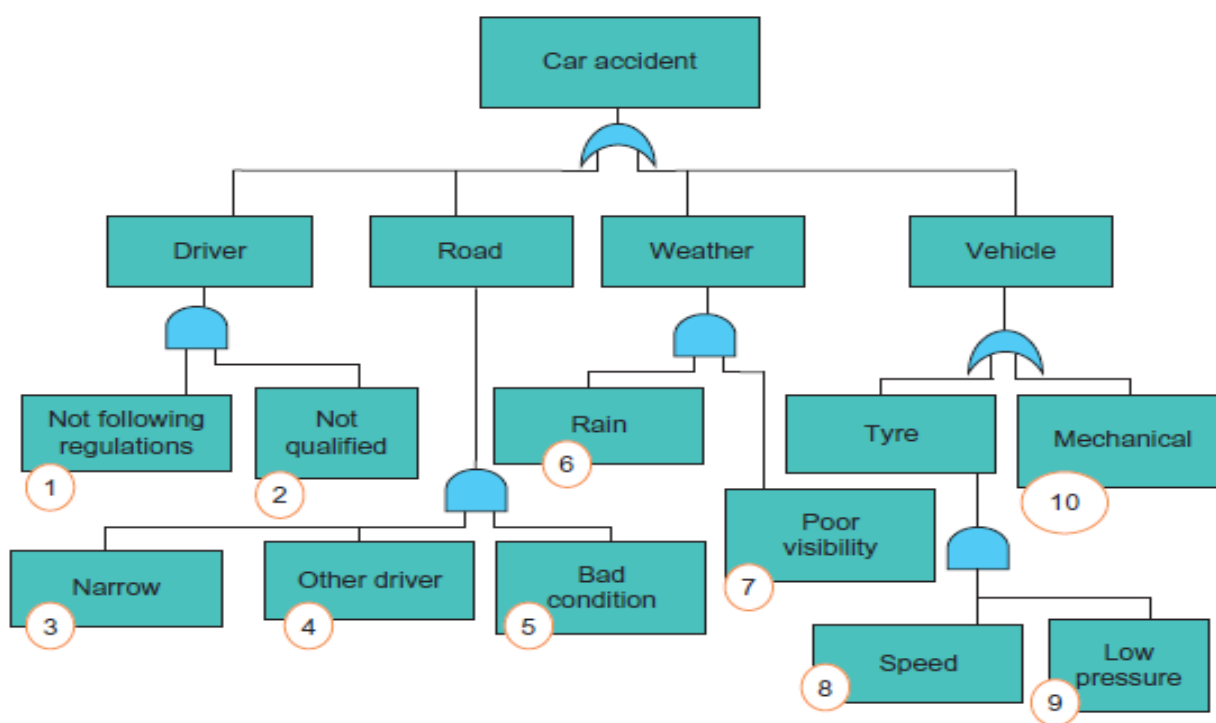


Fig. 7, FTA per l'esempio proposto nel capitolo 5.4.

Si passi ora a costruire l'equivalente RDB (vedi **Fig. 6**), a tale scopo bisogna applicare le regole precedentemente descritte nel paragrafo **5.2.1**.

Statisticamente, gli incidenti tendono ad essere dovuti più alle condizioni meteorologiche o stradali piuttosto che alle condizioni del conducente o del veicolo, si suppongano allora i seguenti valori per l'affidabilità (R) degli eventi descritti in **Fig. 5**:

- **Condizioni del Guidatore:** R1, R2 = 0.9;
- **Condizioni della Strada:** R3, R4, R5 = 0.7;
- **Condizioni Meteo:** R6, R7 = 0.7;
- **Condizioni del Veicolo:** R8, R9, R10 = 0.9.

Quindi:

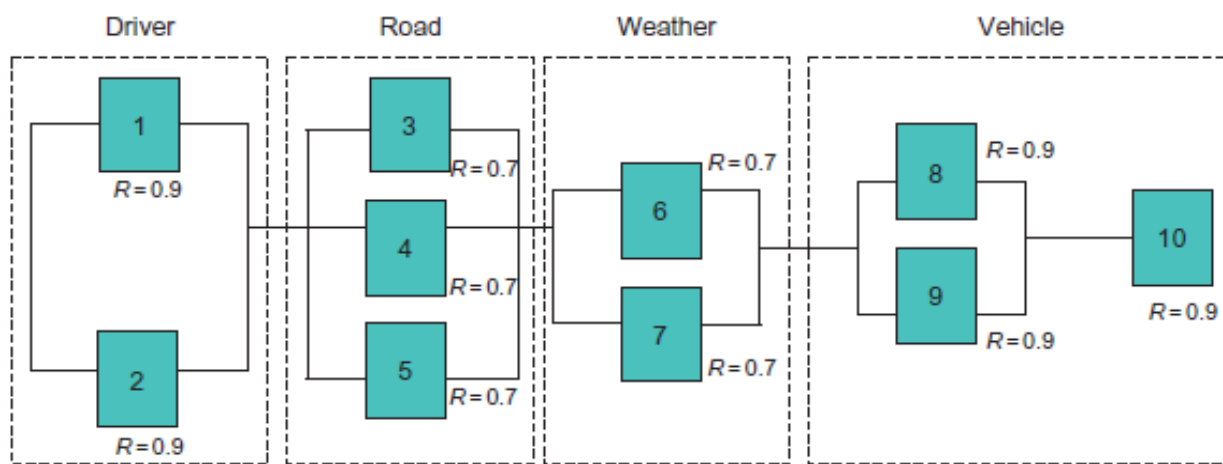


Fig. 8, Diagramma RBD relativo all'esempio del capitolo 5.4.

Si calcoli quindi l'affidabilità del sistema, R_{SYS} :

$$R_{SYS} = [1 - (1 - R1)(1 - R2)][1 - (1 - R3)(1 - R4)(1 - R5)] \times$$

$$\times [1 - (1 - R6)(1 - R7)][1 - (1 - R8)(1 - R9)]R10$$

$$R_{SYS} = [1 - (0.1)(0.1)][1 - (0.3)(0.3)(0.3)][1 - (0.3)(0.3)][1 - (0.1)(0.1)]0.9 = 0.781$$

$$= 78.1\%$$

Perciò, in questo caso dovremmo concludere che la probabilità che avvenga lo schianto è pari al:

$$F_{SYS} = 1 - R_{SYS} = 100 - 78.1\% = 21.9\%$$

Ovvero, esiste una possibilità su cinque che avvenga lo schianto.

6. DIAGRAMMI DI ISHIKAWA, CED

6.1. OVERVIEW:

Le prime applicazioni di questo strumento risalgono al 1943, quando il professor Kaoru Ishikawa propose i diagrammi per riuscire a spiegare ad un gruppo di ingegneri della Kawasaki Steel Works come poter ordinare e interconnettere vari fattori produttivi.

Egli sviluppa tali diagrammi al fine di poter studiare le relazioni causa-effetto tra componenti individuali e l'intero sistema e per poterle ordinare in base alla relativa importanza; originariamente essi trovarono impiego nella soluzione di problemi legati al livello di qualità nei prodotti, in particolar modo per quei problemi legati a variazioni di tipo statistico^[47].

Essi formano infatti uno dei sette strumenti di base dell'approccio gestionale basato sulla qualità, il TQM o total quality management, assieme ad istogrammi, diagrammi di Pareto, fogli di controllo, diagrammi di controllo, diagrammi di flusso e diagrammi a dispersione.

Dal momento che il diagramma in questione assomiglia ad una lisca di pesce, con le spine che si estendono dalla colonna vertebrale (**Fig. 9**), esso è diventato popolare sotto questo nome.

Inoltre, poiché il principio alla base è quello di mostrare le cause di un determinato evento, per permetterne una approfondita analisi, essi vengono anche chiamati diagrammi di causa ed effetto o CED. Tale tecnica incoraggia la raccolta dei dati mettendo in evidenza le aree di competenza o mostrando in quale invece manca un'adeguata conoscenza.

La logica del CED presuppone che non si possa agire fino a quando non si conosce la relazione tra causa ed effetto di un problema. Di conseguenza, il CED tenta di mostrare le cause correlate in modo da poter intraprendere delle azioni correttive.

6.2. PROCEDURA:

Quando si tratta un problema particolarmente serio, è importante esplorare tutti quei fattori che potrebbero causarlo in maniera olistica, cioè considerando come un tutto le singole parti; ciò ancor prima di iniziare a pensare a una soluzione, evitando così di affrontare solo una parte di esso e/o che il problema venga affrontato più e più volte.

L'oggetto d'interesse del nostro studio deve essere un evento desiderato o non desiderato caratterizzato da un certo fattore di rischio, R; fattore legato alla probabilità di occorrenza, p, di

un determinato evento e dall'impatto, I, che esso possiede. il quale deve essere gestito in maniera tale da essere diminuito o sfruttato per esse capitalizzato.

Affinché il problema venga risolto utilizzando il diagramma di Ishikawa,, è necessario che esso soddisfi i seguenti requisiti^{[48],[49]}:

- Deve essere caratterizzato dal rischio $R = p * I$;
- Deve essere un obiettivo gestionale con valenza operativa;
- Le cause che lo producono devono essere caratterizzate da probabilità, possibilità o frequenza di occorrenza;
- A loro volta, le cause principali devono essere considerate anch'esse come effetti (secondari o di secondo ordine);
- Le cause che rappresentano le cause degli effetti secondari, ovvero le cause delle cause principali, denominate effetti collaterali; devono a loro volta soddisfare i requisiti e le stesse condizioni delle cause principali;
- non devono esistere correlazioni biettive, il che significa che l'effetto non deve trasformarsi nella sua causa, indipendentemente dal posizionamento nel diagramma.

L'identificazione delle cause principali e secondarie e la loro formalizzazione devono soddisfare le stesse condizioni di cui sopra per il problema, unitamente a quanto segue^{[50],[51]}:

- È possibile identificare un criterio di priorità o una certa sequenza temporale (cronologica) o una certa probabilità, possibilità o frequenza di occorrenza;
- Le cause principali possono avere o meno una o più cause secondarie;
- Rispondere alla domanda, "l'appartenenza di queste cause può essere identificata?": endogena al sistema o esogena al sistema e quindi appartenente all'ambiente;
- Il numero di cause principali e secondarie deve essere ragionevole, in genere non superiore a 7-9 per le cause principali e 2-3 per le cause secondarie di una causa principale;
- Le cause principali e secondarie devono essere rappresentative e dovrebbero consentire il monitoraggio o persino la gestione (possono essere approvate o sanzionate mediante valutazioni);

- I nomi indicati devono essere rappresentativi e suggestivi per la relazione causa-effetto e al contempo descrivere i rischi che caratterizzano la rilevanza della causa.

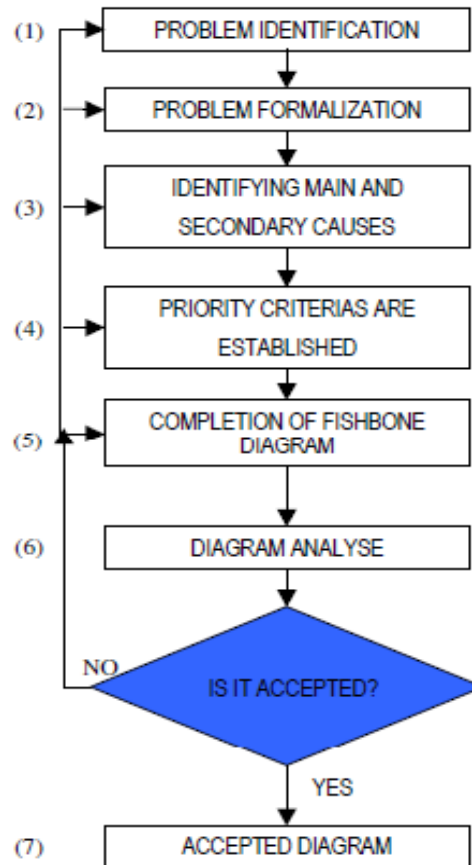


Fig. 9, Schema logico per l'implementazione di un diagramma di Ishikawa.

6.2.1. Passaggi chiave:

Lo schema logico in **Fig. 9** descrive il processo di implementazione del diagramma di Ishikawa, nel mentre^{[52],[53]}:

- 1) Problemi, sintomi, conseguenze e rischi vengono identificati;
- 2) Tecniche di colloquio e consulenza con il personale vengono impiegate;
- 3) Vengono stimate le dimensioni ipotetiche dei danni;
- 4) Definizione della cronologia degli eventi;
- 5) Definizione delle priorità di trattamento;

- 6) Le cause principali vengono dettagliate;
- 7) Il diagramma viene presentato nei consigli di amministrazione, conferenze o consultazioni;
- 8) L'accettazione o meno del diagramma viene decisa dal top management attraverso un funzionario.

6.3. DETERMINARE IL RISCHIO GLOBALE:

Il valore del rischio globale dell'effetto indesiderato, R_g , è condizionato dal rischio di produrre cause principali e ne rappresenta la somma ponderata.

R_g , rappresenta la somma ponderata dei rischi delle categorie distribuite sul lato sinistro, R_s , e sul lato destro, R_d ; i cui contributi al rischio globale sono a loro volta ponderati in relazione alle di questi contribuzioni relative (pesi p_s e p_d):

$$R_g = p_s * R_s + p_d * R_d$$

dove la somma dei pesi di entrambe le categorie deve essere uguale a 1 ($p_s + p_d = 1$).

A sua volta, ogni categoria di rischio è una somma ponderata delle principali cause dei rischi distribuiti a sinistra o a destra, ciò significa che R_s è scritta come segue:

$$R_s = \sum_{i=1}^n p_i * R_{s_i}$$

con $\sum_{i=1}^n p_i = 1$ che rappresenta la somma dei pesi delle principali cause distribuite a sinistra, R_{s_i} .

R_d è a sua volta scritto come segue:

$$R_d = \sum_{j=1}^m p_j * R_{d_j}$$

con $\sum_{j=1}^m p_j = 1$ che rappresenta la somma dei pesi delle principali cause distribuite a destra, R_{d_j} .

Inoltre, ogni rischio di una causa principale rappresenta la somma ponderata dei rischi delle cause secondarie che ne determinano l'esistenza (l'effetto):

$$R_{s_i} = \sum_{i,k} p_{i,k} * R_{s_{i,k}}$$

con $\sum_{i,k} p_{i,k}$ che rappresenta la somma dei rischi delle cause secondarie che determinano l'esistenza delle cause principali a sinistra, $Rs_{i,k}$. Rd_j diviene dunque:

$$Rd_j = \sum_{j,l} p_{j,l} * Rd_{j,l};$$

con $\sum_{j,l} p_{j,l}$ che rappresenta la somma dei rischi delle cause secondarie che determinano l'esistenza delle cause principali a destra, $Rd_{j,l}$.

6.3.1. Passaggi chiave nella determinazione del rischio globale:

La determinazione del rischio globale avviene tramite il seguente algoritmo^[54], basato su formalizzazioni dirette e matrici di controllo:

- Valutare o determinare i rischi relativi alle cause secondarie ($Rs_{i,k}$ e $p_{i,k}$, $Rd_{j,l}$ e $p_{j,l}$), usando qualsiasi metodo che può condurre a dei risultati plausibili e, ovviamente, alla formalizzazione appropriata;
- Determinare i rischi delle cause principali come somme ponderate dei rischi delle cause secondarie e valutare o determinare i pesi all'interno della categoria di appartenenza (Rs_i e p_i , Rd_j e p_j);
- Determinare le categorie di rischio per ogni lato (Rs e Rd) e valutare o determinare il loro peso sul rischio globale (ps e pd);
- Determinare il rischio globale (Rg) dell'effetto (evento).

6.4. DISEGNARE UN DIAGRAMMA DI ISHIKAWA:

Kaoru Ishikawa delinea i seguenti passi per la costruzione di un CED^[55]:

- 1) Decidere il problema, l'evento o l'effetto indesiderato da migliorare o controllare.
- 2) Scrivere il problema, l'evento o l'effetto indesiderato sul lato destro e disegnare una freccia da sinistra a destra, come mostrato in **Fig. 11**, punto **A**;
- 3) Scrivere i principali fattori che potrebbero causare il problema, l'evento o l'effetto indesiderato disegnando le frecce dei rami principali, come mostrato in **Fig. 11**, punto **B**;
- 4) Per ogni ramo principale, fattori causali dettagliati vanno scritti e collegati come ramoscelli su ogni ramo principale del diagramma, come mostrato in **Fig. 11**, punto **C**;

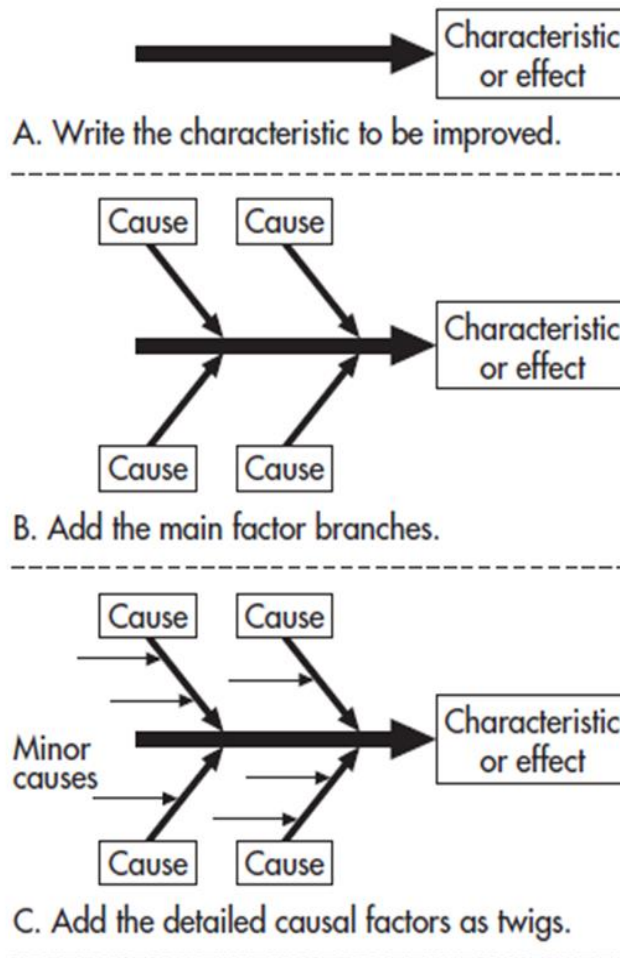


Fig. 10, Costruzione di un diagramma di Ishikawa.

- 5) Assicurarsi che tutti gli elementi che potrebbero causare il problema vengano considerati e inclusi nel diagramma.

Le principali categorie di cause possono essere inizialmente identificate usando il metodo delle quattro M: materiale, metodi, macchine e forza lavoro (manpower), o più correttamente, il metodo delle quattro P: parti (risorse, quali ad esempio le materie prime), procedure, impianti (plants) e persone.

Le categorie possono anche essere personalizzate in base al problema^[56]; a questo proposito, esistono differenti tipologie di grafici CED:

- CED a dispersione:

Questa tipologia prevede lo sviluppo dei rami principali attraverso il raggruppamento delle cause più probabili. L'analista deve quindi identificare il motivo per cui si verificano le dispersioni o variazioni nel problema. Le ragioni delle dispersioni vengono poi disegnate come rami che si estendono dal tronco principale^[57].

Il vantaggio di questo metodo è che la scomposizione delle cause in fattori di livello minore ma più dettagliati aiuta ad organizzarle e metterle in relazione. Lo svantaggio è che la forma finale del diagramma dipende fortemente dalla persona o dal gruppo che lo costruisce, ciò comporta che piccole cause di variazione possano essere trascurate^[58].

- **CED per classificazione di processo:**

Questo diagramma vede elencate tutte le fasi del processo sulla freccia principale. Quei fattori che potrebbero influire su un particolare passaggio del processo vengono aggiunti come rami o se necessitano di essere valutati più nel dettaglio si sviluppano come singoli CED. Il risultato finale assomiglia ad una catena di montaggio.

Il metodo risulta vantaggioso poiché di facile lettura, lo svantaggio risiede nel fatto che cause simili possano comparire ripetutamente, mentre cause dovute all'interdipendenza di fattori risultano difficili da illustrare^[59].

- **CED per enumerazione delle cause:**

I CED per enumerazione delle cause elencano in maniera semplice tutte le possibili cause proposte del problema e le organizzano in base alla loro relazione con questo e a vicenda.

Tra i vantaggi, la possibilità di elencare tutte le cause proposte e di conseguenza l'incoraggiamento a trovare le soluzioni senza limitare il pensiero; il diagramma risultante è perciò abbastanza completo. Lo svantaggio di questa tecnica è che può essere difficile stabilire una relazione diretta tra una determinata causa e l'effetto finale^[60].

6.5. RISULTATI:

Il metodo può essere utilizzato per qualsiasi tipo di problema e può essere personalizzato dall'utente per adattarsi alle circostanze. L'uso di questo strumento ha diversi vantaggi che permettono di migliorare i processi:

- È uno strumento visivo semplice e di facile apprendimento;
- Coinvolge la forza lavoro nella risoluzione dei problemi (la preparazione del diagramma a lisca di pesce fornisce istruzione a tutto il team);
- Permette di organizzare le discussioni e rimanere concentrati sulle questioni attuali;

- Promuove il "system thinking", cioè il concetto che le i diversi processi svolti dalle singole componenti, asservano tutti ad un unico scopo, cioè permettere al sistema di svolgere la sua funzione;
- Dà priorità ad ulteriori analisi e azioni correttive.

6.6. UN ESEMPIO DI APPLICAZIONE DI UN CED:

Si analizza di seguito il caso di un'impresa che voglia arginare un evento indesiderato^[61], la perdita di analisti, tale effetto possiede un rischio associato, tale Rg, frutto dei rischi associati alle cause del suddetto evento, si procede col mostrare in dettaglio come sviluppare un diagramma di Ishikawa (**Fig. 12**) per il problema e come ottenere il valore di Rg:

- Vengono individuate 6 cause principali (gestione, organizzazione, ubicazione, mercato, orizzonte professionale e benefici) e 11 cause secondarie, una per la causa principale orizzonte professionale e due per ognuna delle restanti;
- La rappresentazione sull'asse del diagramma viene fatta in ordine di importanza (o presunta tale), dall'inizio dell'asse fino alla fine di esso; le cause più importanti si troveranno perciò all'inizio (gestione e mercato);
- Il posizionamento delle cause principali nella zona superiore (considerata la parte sinistra dell'asse) o nella zona inferiore (considerata la parte destra dell'asse) del diagramma viene effettuato secondo un ordinamento a cascata, le capacità di gestione influenzano quelle organizzative che a ricaduta influenzano la qualità del luogo in cui si sviluppa il processo; lo stesso vale per le condizioni di mercato che influenzano l'orizzonte professionale e i potenziali vantaggi;

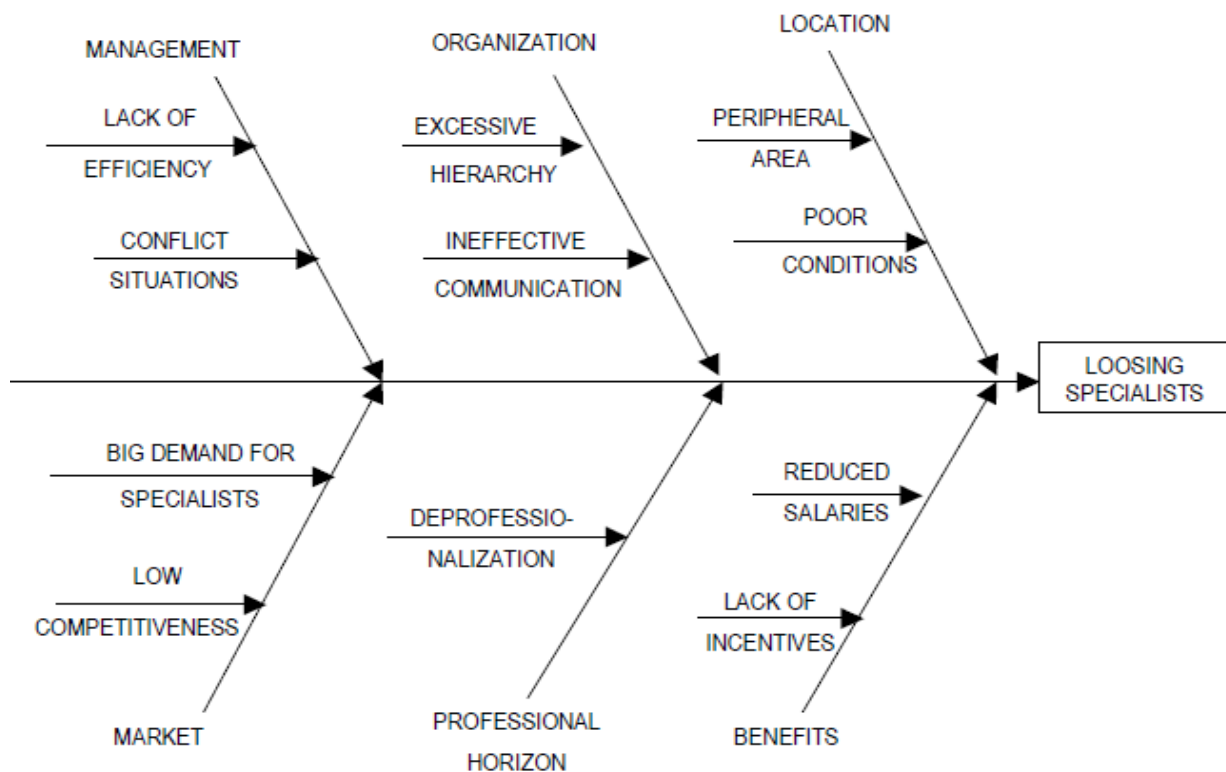


Fig. 11, Diagramma di Ishikawa per l'esempio proposto.

- La stessa logica va applicata anche allo studio delle cause secondarie, nel senso che quelle più lontane dell'asse orizzontale avranno una rilevanza superiore rispetto a quelle più vicine (ad esempio nella gestione, le situazioni di conflitto sono meno rilevanti nel processo rispetto alla mancanza di efficienza);
- la scelta dei nomi delle cause principali (gestione, mercato, organizzazione, ubicazione ecc.) e secondarie (de-professionalizzazione, bassa competitività, cattive condizioni, ecc.), è stata fatta osservando che rappresentano le principali cause rilevanti durante il processo.

Nell'esempio presentato in questo testo, la distribuzione delle sei cause principali, a sinistra e a destra (su e giù) dell'asse orizzontale, è stata effettuata in base alle seguenti categorie:

- Condizioni che riguardano l'impresa e la concorrenza (gestione, organizzazione e luoghi);
- Prospettive di carriera e retribuzione (mercato, orizzonte professionale e benefici).

Current issue	CAUSE	SUB-CAUSE	CODE
1	Management		S ₁
1.1		Lack of efficiency	S ₁₁
1.2		Conflict situations	S ₁₂
2	Organization		S ₂
2.1		Excessive hierarchy	S ₂₁
2.2		Ineffective communication	S ₂₂
3	Locations		S ₃
3.1		Peripheral area	S ₃₁
3.2		Poor conditions	S ₃₂
4	Market		D ₁
4.1		Big demand for specialists	D ₁₁
4.2		Low competitiveness	D ₁₂
5	Professional horizon		D ₂
5.1		Deprofessionalization	D ₂₁
6	Benefits		D ₃
6.1		Reduced salary	D ₃₁
6.2		Lack of incentives	D ₃₂

Fig. 12, Tabella per la codificazione delle cause.

Se avessimo scelto i criteri di ripartizione delle cause principali in base all'ambiente o al processo di appartenenza; nella zona superiore (considerata la parte sinistra dell'asse) verrebbero rappresentate le cinque cause endogene, ovvero quelle influenzabili dall'impresa, mentre nella zona inferiore (considerata la parte destra dell'asse), sarebbe presente unicamente il mercato, l'unico a rappresentare una causa esogena.

Il passo successivo prevede la codifica delle cause secondarie secondo il lato d'appartenenza ($S_{i,k}, D_{j,l}$), come mostrato in **Fig. 13** e la successiva determinazione del rischio ad esse associato (**Fig. 14**)^{[62],[63]}, attraverso la formalizzazione dell'equazione $R = p * I$, in cui p indica la probabilità d'occorrenza e I l'impatto che tale avvenimento possiede.

Una volta conclusi tali calcoli risulta possibile andare a determinare i valori di rischio per le cause principali (S_i, D_j); questi saranno ottenibili attraverso le equazioni:

$$Rs_i = \sum_{i,k} p_{i,k} * Rs_{i,k} \quad e \quad Rd_j = \sum_{j,l} p_{j,l} * Rd_{j,l};$$

come mostrato in precedenza nel capitolo 6.3.

Current issue	CAUSE	PROBABILITY (p)	IMPACT (I)	RISK (R)
1	S ₁₁	0,32	0,69	0,22
2	S ₁₂	0,32	0,44	0,14
3	S ₂₁	0,51	0,78	0,40
4	S ₂₂	0,51	0,65	0,33
5	S ₃₁	0,38	0,50	0,19
6	S ₃₂	0,38	0,82	0,31
7	D ₁₁	0,66	1	0,66
8	D ₁₂	0,66	0,77	0,51
9	D ₂₁	1	0,36	0,36
10	D ₃₁	0,78	0,54	0,42
11	D ₃₂	0,78	0,77	0,55

Fig. 13, Tabella per la determinazione del rischio delle cause secondarie.

Ulteriori informazioni sono però necessarie, quali i valori dei pesi associati ad ogni causa secondaria; tali valori possono essere determinati attraverso l'impiego di varie metodologie. I valori considerati vengono proposti a titolo esemplificativo in **Fig. 14**. I pesi delle cause devono rispettare le leggi:

$$\sum_{i,k} p_{i,k} = 1 \quad e \quad \sum_{j,l} p_{j,l} = 1;$$

A titolo esemplificativo vengono riportati i passaggi dei calcoli per le cause **S₁** e **D₃**:

$$Rs_1 = p_{1.1} * Rs_{1.1} + p_{1.2} * Rs_{1.2} = 0.70 * 0.22 + 0.30 * 0.14 = 0.20;$$

$$Rs_2 = p_{2.1} * Rs_{2.1} + p_{2.2} * Rs_{2.2} = 0.36;$$

$$Rs_3 = p_{3.1} * Rs_{3.1} + p_{3.2} * Rs_{3.2} = 0.36;$$

$$Rd_1 = p_{1.1} * Rd_{1.1} + p_{1.2} * Rd_{1.2} = 0.61;$$

$$Rd_2 = p_{2.1} * Rd_{2.1} = 0.36;$$

$$Rd_3 = p_{3.1} * Rd_{3.1} + p_{3.2} * Rd_{3.2} = 0.31 * 0.42 + 0.69 * 0.55 = 0.51 ;$$

SECONDARY CAUSES/ CATEGORIES	MAIN CAUSES						WEIGHTS CONTROL	EFFECT WEIGHT
	S ₁	S ₂	S ₃	D ₁	D ₂	D ₃		
S ₁₁ S ₁₂	0,70 0,30							
Weight control	1							
S ₂₁ S ₂₂		0,35 0,65						
Weight control		1						
S ₃₁ S ₃₂			0,21 0,79					
Weight control			1					
D ₁₁ D ₁₂				0,70 0,30				
Weight control				1				
D ₂₁					1			
D ₃₁ D ₃₂						0,31 0,69		
Weight control						1		
Left side category S.	0,51	0,33	0,16				1	0,44
Right side category D				0,42	0,22	0,36	1	0,56
Weight control								1

Fig. 14, Tabella per l'associazione e il controllo dei pesi.

Con lo stesso procedimento e sempre facendo riferimento ai pesi indicati in Fig. 14, si procede ora a calcolare i valori per le categorie di rischio (Rs, Rd):

$$Rs = p_1 * Rs_1 + p_2 * Rs_2 + p_3 * Rs_3 = 0.27 ;$$

e

$$Rd = p_1 * Rd_1 + p_2 * Rd_2 + p_3 * Rd_3 = 0.52 ;$$

A questo punto, è finalmente possibile calcolare il valore del rischio associato alla perdita di specialisti, Rg:

$$Rg = p_s * Rs + p_d * Rd = 0.41 ;$$

Ottenuti tutti i valori di rischio per le cause principali e l'evento indesiderato, questi vengono ordinati e classificati secondo la loro criticità; fonti di rischio

1. TRASCURABILE (0-20%);
2. MINORE (21-40%);
3. MEDIO (41-60%);
4. PRINCIPALE (61% in poi);

potremo quindi classificare le cause principali come segue:

1. TRASCURABILE, la capacità di gestione;
2. MINORE, la capacità d'organizzazione, la posizione e l'orizzonte temporale;
3. MEDIO, i vari benefici associati al ruolo;
4. PRINCIPALE, al ruolo del mercato.

Nella categoria a rischio MEDIO risulta anche il rischio generale ($R_g = 0.41$), i risultati ottenuti vanno dunque valutati attraverso un criterio R_c , il quale viene rappresentato da un valore numerico e che ci permetta di intervenire ove necessario fornendo una base decisionale:

- Per $R < R_c$, nessuna azione correttiva viene implementata. Sebbene R possa avere un valore anche elevato, qualora esso sia minore del valore critico R_c , nessun intervento correttivo è richiesto;
- Per $R > R_c$, misure preventive o azioni correttive sono richieste e quanto più il valore di R risulta maggiore del valore critico R_c , tanto più tali misure saranno richieste a carattere immediato.

Per l'esempio in esame, si supponga di impiegare come valore critico 0,5 ($R_c = 50\%$), il rischio generale di perdere specialisti diviene allora per l'impresa un rischio che non necessita di particolare attenzione date le condizioni attuali.

Supponendo però che esso venga preso in considerazione, allora azioni correttive verranno richieste per quei fattori di rischio legati al lato destro del diagramma ($R_d = 0.52$), nello specifico relativi ai benefici che gli specialisti percepiscono ($R_{d_3} = 0.51$, $R_{d_{3,2}} = 0.55$), e alle condizioni del mercato ($R_{d_1} = 0.66$), nello specifico la grande domanda di personale proprio per tale incarico ($R_{d_{1,1}} = 0.66$) e/o la mancanza di figure formate proprio per tale ruolo ($R_{d_{1,2}} = 0.51$).

7. CONCLUSIONI

Le tecniche che permettono di valutare il corretto funzionamento di un sistema sono assai numerose, in generale è possibile individuare una divisione in due grandi categorie, quelle che seguono una logica di modellazione di tipo deduttivo o top-down, e quelle che invece impiegano una logica di tipo induttivo o bottom-up; la differenza sostanziale risiede nel differente punto di partenza, essendo esso un guasto a livello sistemico nel primo caso ed invece un guasto nelle componenti elementari nel secondo.

La metodologia deduttiva storicamente più diffusa è la fault tree analysis (FTA) o analisi dell'albero dei guasti; questa tecnica top-down, che inizia con il determinare degli eventi indesiderati, è finalizzata all'individuazione delle possibili cause che hanno portato al manifestarsi di questi. L'impiego di questa tecnica risulta assai utile nel determinare quanto un sistema sia resistente a possibili eventi di guasto, siano essi singoli o multipli; la sua applicazione non garantisce però che tutti le possibili cause di guasto vengano identificate.

Al contrario, l'analisi delle modalità di guasto e dei loro effetti, FMEA, permette di catalogare in modo esauriente le cause dei guasti e di identificare i loro effetti a livello locale e sistemico. La failure modes and effect analysis è una tecnica bottom-up, di tipo induttivo, finalizzata all'analisi degli effetti dei guasti di singoli componenti o sottosistemi rispetto al funzionamento delle apparecchiature o del sistema in generale.

Anche la FMEA possiede dei difetti intrinseci ed infatti, al contrario della FTA, non permette l'analisi di possibili eventi di guasto se non singolarmente e non prende in considerazione possibili cause legate all'ambiente esterno, possibilità che è invece presente in quest'ultima.

Possibili alternative all'analisi FTA e all'analisi FMEA sono rappresentate rispettivamente dai diagrammi di Ishikawa e dai diagrammi a blocchi per l'affidabilità, gli RBD. Come l'FTA e l'FMEA in precedenza, ognuna di queste tecniche possiede punti di forza e delle debolezze intrinseche che ne influenzano l'applicazione.

I diagrammi di Ishikawa sono anche noti come CED ovvero diagrammi causa-effetto, ciò deriva dalla modalità impiegata per la loro costruzione la quale risulta molto simile alla costruzione degli alberi FTA. Una volta individuato un effetto indesiderato, si cerca di determinare quali siano le cause che hanno portato ad esso; a loro volta tali cause vengono dettagliate ed ulteriori sottocause vengono aggiunte al diagramma.

Nonostante siano stati creati principalmente per risolvere problematiche legate a problemi di qualità, questi diagrammi hanno trovato ampio impiego in tematiche quali la root causes failure

analysis o RCFA, che si occupa di ricercare proattivamente quelle che possono essere considerate le radici delle cause di eventi di guasto, siano essi alle attrezzature o alle strutture. Indubbiamente, il vantaggio di tale applicazione è la rappresentazione schematica del flusso di materiali e delle operazioni eseguite su di essi.

Questo aspetto in particolare accomuna le tecniche RBD, FTA ed i diagrammi di Ishikawa, sebbene questi ultimi svolgano pressoché la stessa funzione, i CED vedono un utilizzo focalizzato all'individuazione di cause delle tipologie più svariate e che non sono necessariamente legate alla componente hardware o software di un sistema e del suo ambiente esterno (si veda il capitolo 6.6. esempio di applicazione di un CED), come nel caso degli dei guasti, risultando quindi in un approccio più generale ma non per questo meno accurato.

Anche i diagrammi a blocchi per l'affidabilità prendono in considerazione specialmente cause legate alle componenti hardware e software ma sebbene si possa affermare che le tecniche FTA ed RBD siano alternative, poiché esse impiegano differenti logiche e producono inoltre output diversi, essendo rispettivamente una tecnica di tipo deduttivo che analizza la causa logica del guasto ed una tecnica di tipo induttivo che mostra le deficienze del sistema, si riconosce che ciò può essere discutibile in alcuni casi.

FTA e RBD sono infatti tecniche complementari, non solo il risultato di una FTA viene spesso utilizzato come input per la produzione di un RBD; ma anche in quanto gli FTA permettono di calcolare le probabilità che avvenga un guasto mentre gli RBD calcolano l'affidabilità del sistema e delle componenti, che è la probabilità di non avere guasti, valori complementari che se sommati forniscono l'intero orizzonte di probabilità.

Inoltre, un RBD mostra chiaramente quelle che sono le aree di vulnerabilità del sistema, disponendo i blocchi in una struttura in serie, ed evidenziando quelle che sono le aree relativamente sicure attraverso blocchi in parallelo. Ciò non risulta facilmente visibile da un FTA, dal quale è difficile giungere a tali conclusioni da una struttura gerarchica di porte OR e AND.

Altro elemento in comune è l'impossibilità di modellare guasti simultanei ad unità identiche causati dallo stesso motivo e avvenuti nello stesso modo; ciò farebbe cadere una delle ipotesi alla base delle metodologie, ovvero l'indipendenza tra le probabilità di guasto dei singoli componenti. Per ovviare a tali limitazioni, possono essere impiegate metodologie basate sull'analisi dello spazio di stato, quali catene di Markov a tempo continuo (Continuous Time Markov Chains, CTMC) e reti di Petri temporizzate o stocastiche (Timed/Stochastic Petri Nets, TPN/SPN), metodologie non analizzate in questo testo.

In conclusione, è opportuno evidenziare come non esista un metodo di analisi che sia in assoluto migliore degli altri. La scelta va fatta in funzione di tutta una serie di fattori, tra cui la portata e la profondità dell'analisi, la facilità d'uso, gli attributi da valutare, gli obiettivi dell'analisi, e non ultima, l'efficienza degli algoritmi risolutivi (che potrebbe impedire, la soluzione dei modelli di una certa complessità, tutt'altro che rari nelle applicazioni reali).

Risulta dunque chiaro come l'unica soluzione soddisfacente al problema possa essere l'impiego sinergico di tecniche di modellazione differenti attraverso cui poi andare a studiare in maniera olistica il sistema. Ecco allora che tecniche di modellazione multi-formalismo, che impiegano cioè logiche di analisi sia induttive che deduttive, possono essere impiegate per rappresentare sistemi anche molto complessi; i singoli risultati verranno poi trattati come parti di un organismo e potranno quindi essere uniti per fornire una visione generale del tutto.

BIBLIOGRAFIA:

[1] <http://www.treccani.it/vocabolario/classificazione/>;

[2],[3] Kamiński, B.; Jakubczyk, M.; Szufel, P. (2017). A framework for sensitivity analysis of decision trees. Central European Journal of Operations Research;

[4] Manganaro, V.A., Tecniche di DM: Alberi di decisione ed algoritmi di classificazione (pdf);

[5] Roger J. Lewis, M.D. (2014). An Introduction to Classification and Regression Tree (CART) Analysis, Ph.D., Department of Emergency Medicine, Harbor-UCLA Medical Center, Torrance, California;

[6] Quinlan, J. R. (1987). Simplifying decision trees. International Journal of Man-Machine Studies;

[7] Bloch, Heinz; Geithner, Fred (1994). Machinery Failure Analysis and Troubleshooting. Houston, Texas: Gulf Publishing Company;

[8] McKenna, T. and Oliverson, R. (1997). Glossary of Reliability and Maintenance Terms, Gulf Publishing Co., Houston, Texas;

[9] Brauer, D.C. and Brauer, G.D. (1987). Reliability-centered maintenance, IEEE Transac. Reliability;

[10] (1996). Reliability Centered Maintenance Guide for Facilities and Collateral Equipment, National Aeronautics and Space Administration (NASA), Washington, D.C.;

[11],[36],[37],[38] Dhillon, B.S. (2002). Maintenance Engineering, A Modern Approach (Ph.D. Thesis). CRC Press, Boca Raton;

[12] NAVAIR 00-25-403, Guidelines for the Naval Aviation Reliability-Centered Maintenance Process, Naval Air Systems Command, Department of Defense, Washington, D.C., October 1996;

[13] United States Department of Defense (9 November 1949). MIL-P-1629 – Procedures for performing a failure mode effect and critical analysis. Department of Defense (US). MIL-P-1629;

[14] Countinho, J.S. (1964). Failure effect analysis, Transac. New York Academy of Sciences, 26;

[15] Arnzen, H.E. (1966). Failure Mode and Effect Analysis: A Powerful Engineering Tool for Component and System Optimization, Report No. 347.40.00.00-K4-05 (C5776), GIDEP Operations Center, Corona, California;

- [15] <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19700076494.pdf>;
- [17] Goddard Space Flight Center (GSFC) (1996). Performing a Failure Mode and Effects Analysis (pdf). Goddard Space Flight Center;
- [18],[21] Mannan, S. (Ed.) (2012), Lees Loss Prevention in the Process Industries, fourth ed., Butterworth-Heinemann;
- [19],[22] Wells, G. (1996)., Hazard Identification and Risk Assessment, IChemE, Rugby;
- [20],[23] (1991). BS 5760 Part 5, Guide to Failure Modes and Criticality Analysis;
- [24] Crawley, F. (2020). A Guide to Hazard Identification Methods, Chapter 12: Failure modes and effects analysis (FMEA) and failure modes, effects and criticality analysis (FMECA), Elsevier.
- [25] Ericson, Clifton (1999). Fault Tree Analysis - A History (PDF). Proceedings of the 17th International Systems Safety Conference;
- [26] Winter, Mathias (1995). Software Fault Tree Analysis of an Automated Control System Device Written in ADA (pdf). (Master's Thesis).;
- [27] Benner, Ludwig (1975). Accident Theory and Accident Investigation. Proceedings of the Society of Air Safety Investigators Annual Seminar;
- [28] Goldberg, B. E.; Everhart, K.; Stevens, R.; Babbitt, N.; Clemens, P.; Stout, L. (1994). "3". System engineering toolbox for design-oriented engineers. Marshall Space Flight Center;
- [29] Center for Chemical Process Safety (April 2008). Guidelines for Hazard Evaluation Procedures (3rd ed.). Wiley;
- [30] Center for Chemical Process Safety (October 1999). Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis (2nd ed.). American Institute of Chemical Engineers;
- [31] U.S. Department of Labor Occupational Safety and Health Administration (1994). Process Safety Management Guidelines for Compliance (PDF). U.S. Government Printing Office. OSHA 3133;
- [32] ICH Harmonised Tripartite Guidelines. Quality Guidelines (January 2006). Q9 Quality Risk Management;
- [33] Lacey, Peter (2011). An Application of Fault Tree Analysis to the Identification and Management of Risks in Government Funded Human Service Delivery. Proceedings of the 2nd International Conference on Public Policy and Social Sciences;

- [34] Vesely, William; et al. (2002). Fault Tree Handbook with Aerospace Applications (PDF). National Aeronautics and Space Administration;
- [35] Grant Ireson, W., Coombs, C.F., and Moss, R.Y., ed. (1996). Handbook of Reliability Engineering and Management, McGraw-Hill, New York,;
- [39] Redundancy Management Technique for Space Shuttle Computers (PDF), IBM Research;
- [40] "Fail-safe". AudioEnglish.net;
- [41] Rutherford, D.B.Jr. (1990). What Do You Mean It's Fail-Safe?, Rapid Transit Conference;
- [42] (1998). Electronic Design Handbook, MIL-HDBK-338B;
- [43] Modarres, M.; Kaminskiy, M.; Krivtsov, V. (1999). "4" (pdf). Reliability Engineering and Risk Analysis. Ney York, NY: Marcel Decker, Inc. p. 198;
- [44] (1998). 6.4 Reliability Modeling and Prediction. Electronic Reliability Design Handbook. B. U.S. Department of Defense. MIL-HDBK-338B.;
- [45],[46] Labib, A. (2014). Learning from Failures: Decision Analysis of Major Disasters, Elsevier;
- [47] Kiran, D.R., (2017) Total Quality Management, Chapter 20: Sevent traditional tools of TQM;
- [48],[50],[52] Ilie, G. (2009). De la management la guvernare prin risc. Bucharest: UTI Press & Detectiv;
- [49],[51],[53],[54],[61],[62] Ilie, G., Ciocoiu, C.N., Management Research and Practice, Volume 2, Issue 1 / March 2010: Application of fishbone diagram to determine the risk of an event with multiple causes;
- [55] Ishikawa, K. (1982). Guide to quality control, second edition. Tokyo: Asian Productivity Organization;
- [56] Moran, J. W., R. P. Talbot, and R. M. Benson. (1990). A guide to graphical problem-solving processes. Milwaukee: ASQ Quality Press;
- [57] Sproull, B. (2001). Process problem solving: A guide for maintenance and operations teams. Portland: Productivity Press;
- [58],[59],[60] Andersen, B., and T. Fagerhaug. (2000). Root cause analysis: Simplified tools and techniques. Milwaukee: ASQ Quality Press;
- [63] Ciocoiu, C. N. (2008). Managementul riscului. Teorii, practici, metodologii. Bucharest: ASE;

