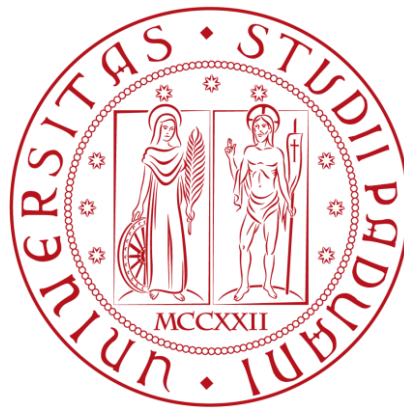


**UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA**

Facoltà di Ingegneria

Dipartimento di Tecnica e gestione dei sistemi industriali

Corso di laurea triennale in Ingegneria Gestionale



Tesi di Laurea Triennale

**Affidabilità dei sistemi meccanici: valutazione dei rischi  
tramite l'approccio Fuzzy-FMEA**

Relatore: Dott. Ing. Lucio Maragoni

Laureando: Pietro Paggio

Anno Accademico: 2022/2023

## ❖ **Indice**

<b>Prefazione.....</b>	<b>4</b>
<b>1. L'ingegneria dell'affidabilità .....</b>	<b>6</b>
<b>1.1 Qualità e Affidabilità .....</b>	<b>6</b>
<b>1.2 Dependability.....</b>	<b>8</b>
<b>1.3 Nascita e storia recente.....</b>	<b>10</b>
<b>2. Metodi per l'analisi dell'affidabilità .....</b>	<b>13</b>
<b>2.1 Importanza dell'affidabilità nella progettazione meccanica .....</b>	<b>13</b>
<b>2.2 La normativa EN 60300-3-1:2004 <i>Dependability Management Part 3-1: Application guide - Analysis techniques for dependability – Guide on methodology.</i> ....</b>	<b>14</b>
<b>2.3 EN IEC 60812: 2018 <i>Failure Modes and Effects Analysis (FMEA and FMECA)</i> .....</b>	<b>17</b>
<b>2.3.1 Pianificazione:.....</b>	<b>20</b>
<b>2.3.2 Esecuzione: .....</b>	<b>21</b>
<b>2.3.3 Documentazione:.....</b>	<b>23</b>
<b>2.3.4 Risk Priority Number .....</b>	<b>23</b>
<b>3. Applicazione della logica Fuzzy all'ingegneria dell'affidabilità .....</b>	<b>25</b>
<b>3.1 Limiti e svantaggi della FMEA.....</b>	<b>25</b>
<b>3.2 Fuzzy Logic .....</b>	<b>26</b>
<b>3.3 Fuzzy Set Theory.....</b>	<b>26</b>
<b>3.4 Possibility Theory.....</b>	<b>27</b>
<b>3.4 L'approccio Fuzzy-FMEA .....</b>	<b>28</b>
<b>4. Casi studio.....</b>	<b>31</b>

<b>4.1 Fuzzy-FMEA di una macchina LHD .....</b>	<b>31</b>
<b>4.1.1 LHD.....</b>	<b>32</b>
<b>4.1.2 FMEA .....</b>	<b>33</b>
<b>4.1.3 Fuzzy-FMEA.....</b>	<b>35</b>
<b>4.1.4 Risultati.....</b>	<b>39</b>
<b>4.1.5 Conclusioni.....</b>	<b>39</b>
<b>4.2 Fuzzy-FMEA di un compressore a bordo di una nave ...</b>	<b>40</b>
<b>4.2.1 Sistema ad aria compressa di una nave .....</b>	<b>41</b>
<b>4.2.2 Metodo di Analisi e risultati .....</b>	<b>42</b>
<b>4.2.3 Conclusioni.....</b>	<b>46</b>
<b>4.3 Fuzzy-FMEA delle operazioni fisiche di un impianto di trattamento delle acque reflue .....</b>	<b>47</b>
<b>4.3.1 Contesto .....</b>	<b>47</b>
<b>4.3.2 Metodo di Analisi.....</b>	<b>48</b>
<b>4.3.3 Risultati.....</b>	<b>51</b>
<b>4.3.4 Conclusioni.....</b>	<b>54</b>
<b>Conclusione.....</b>	<b>56</b>
<b>Bibliografia .....</b>	<b>57</b>

## ❖ Prefazione

Il progresso, la ricerca e l'innovazione, hanno da sempre caratterizzato la realtà che ci circonda. Oggigiorno l'industria propone ai consumatori prodotti sempre più innovativi e tecnologici. Spesso lo sviluppo tecnologico porta complessità e la complessità rivela incertezza, dubbi e preoccupazioni. Anche con la massima attenzione in fase di progettazione e sviluppo di un prodotto, non è scontato che tutto vada secondo i piani e funzioni come da progetto. In questi termini l'affidabilità ha un ruolo fondamentale. Divenuta di recente una vera e propria disciplina ingegneristica, l'affidabilità, attraverso una profonda analisi di ciò che si crea, permette di prevenire l'insorgere di eventuali guasti con conseguenti rischi, durante l'intero ciclo di vita di un prodotto. E' questo di cui si tratta quando si parla di prodotto affidabile, di un prodotto o servizio che duri nel tempo. Quest'ultimo obiettivo della ricerca ingegneristica coincide con la richiesta da parte del cliente di articoli sempre più efficaci ed efficienti. I costi di manutenzione sono spesso costi importanti in termini economici e l'affidabilità è un'ottima misura per far fronte a questa problematica, potendo garantire in tal modo prezzi e costi competitivi nel mercato internazionale. In questo elaborato si affronta lo studio dell'affidabilità di componenti meccanici, focalizzandosi sull'utilizzo dell'approccio *Fuzzy-FMEA*. Nel I capitolo viene introdotto il concetto di affidabilità nel contesto più ampio di qualità di un prodotto; vengono poi proposte una serie di definizioni e viene fatta una panoramica storica sulla nascita e sullo sviluppo recente dell'ingegneria dell'affidabilità. Nel II capitolo, servendosi della normativa tecnica, vengono introdotte le principali metodologie per l'analisi dell'affidabilità di componenti meccanici, soffermandosi poi sulla descrizione dettagliata del metodo *Failure Modes and Effects Analysis* (FMEA). Nel III capitolo, partendo dalle limitazioni del metodo precedentemente esposto, si propone come soluzione l'integrazione di una logica di recente sviluppo: la logica *Fuzzy*. Nel IV e ultimo capitolo sono analizzati 3 casi studio dove viene mostrato l'utilizzo dell'approccio *Fuzzy-FMEA* per l'analisi d'affidabilità di 3 sistemi meccanici. L'intento è quello innanzitutto di far comprendere al lettore cosa si tratta quando si parla di analisi d'affidabilità nell'ingegneria meccanica. A tal proposito si espone una delle metodologie più utilizzate, perché semplice e di facile applicazione, la FMEA, e

evidenziandone limiti e svantaggi, si fornisce al lettore una soluzione innovativa, quale l'utilizzo della logica *Fuzzy*.

## ❖ 1. L'ingegneria dell'affidabilità

In questo capitolo viene introdotto il concetto di affidabilità inserendolo nel contesto più ampio di qualità di un prodotto. Vengono poi scorse una serie di definizioni. Per questi intenti si fa uso della normativa tecnica. Nell'ultimo parte viene proposta una panoramica storica sulla nascita e sullo sviluppo nella seconda metà del '900 dell'ingegneria dell'affidabilità.

### 1.1 Qualità e Affidabilità

Per parlare di affidabilità bisogna prima introdurre il concetto di qualità, poiché è all'interno di questo contesto che trova le sue radici ciò che ad oggi è una vera e propria disciplina ingegneristica. A tal proposito si faccia riferimento alla normativa BS EN ISO 9000:2015 *Quality Management systems – Fundamentals and vocabulary*. La presente norma internazionale propone un ben definito sistema di gestione per la qualità (QMS), basato su un quadro che integra concetti fondamentali stabiliti, principi, processi e risorse relativi alla qualità, nell'idea di aiutare le organizzazioni a realizzare i propri obiettivi. E' applicabile a tutte le organizzazioni indipendentemente dalle dimensioni, complessità o modello di business. Il suo scopo è quello di aumentare la consapevolezza di un'organizzazione sui propri doveri e impegno nel soddisfare le esigenze e le aspettative dei propri clienti e delle parti interessate, e nel raggiungere la soddisfazione con i propri prodotti e servizi [1]. Dal dizionario la parola qualità (dal latino *qualis*, "quale") indica la proprietà che caratterizza una persona, un animale o qualsiasi altro essere, una cosa, un oggetto o una situazione, o un loro insieme organico, come specifico modo di essere soprattutto in relazione a particolari aspetti e condizioni, attività, funzioni e utilizzazioni [2]. Difatti un prodotto ha certe caratteristiche, ha dunque certe qualità e la sua performance, o la sua efficacia, è una funzione di quest'ultime. Tra i concetti fondamentali presentati nella normativa vi è proprio il concetto di qualità:

## **Quality**

*“An organization focused on quality promotes a culture that results in the behavior, attitudes, activities and processes that deliver value through fulfilling the needs and expectations of customers and other relevant interested parties.*

*The quality of an organization’s products and services is determined by the ability to satisfy customers and the intended and unintended impact on relevant interested parties.*

*The quality of products and services includes not only their intended function and performance, but also their perceived value and benefit to the customer.”*

Le ultime due righe sottolineano come la qualità dei prodotti e dei servizi offerti, non includi solamente la funzione e le prestazioni previste, ma anche il loro valore percepito e il beneficio per il cliente. *L’American Society for Quality (ASQC Glossary and Tables for Statistical Quality Control 1983)* definisce la qualità come: “la totalità delle caratteristiche di un prodotto o servizio che influiscono nella sua capacità di soddisfare le esigenze date dall’utente” [3]. Lo studioso *Walter Shewhart*, padre degli studi statistici e probabilistici nel problema del controllo della qualità che contribuirono alla nascita dell’ingegneria dell’affidabilità, sosteneva come, l’obiettivo primario di un ingegnere nel cercare di soddisfare tali esigenze, fosse quello di tradurre quest’ultime nelle caratteristiche fisiche che un prodotto o un servizio avesse dovuto avere per ottenere un riscontro positivo nelle richieste del cliente [3]. E’ uno degli obiettivi che si propone il *Quality Function Development (QFD)*, approccio strutturato che trova nella “*voice of the customer*” il punto di partenza per definire necessità e bisogni, e tradurre il tutto in piani specifici per produrre “*target values*”, ossia prodotti con caratteristiche qualitative, configurazioni progettuali, parametri progettuali e caratteristiche tecnologiche che soddisfino tali esigenze [4]. Nel 1985, venne svolto sempre per *l’American Society for Quality Control*, un sondaggio su oltre 1000 individui per determinare quali caratteristiche fossero le più importanti nella selezione di un prodotto. Ai 10 attributi mostrati in figura veniva assegnato da ogni individuo un punteggio da 1 (meno importante) a 10 (più importante). La tabella mostra per ogni attributo i punteggi medi [5].

TABLE 1.1 Ten most important product attributes

Attribute	Average score
Performance	9.5
<b>Lasts a long time (reliability)</b>	<b>9.0</b>
Service	8.9
<b>Easily repaired (maintainability)</b>	<b>8.8</b>
Warranty	8.4
Easy to use	8.3
Appearance	7.7
Brand name	6.3
Packaging/display	5.8
Latest model	5.4

*Tabella 1.1.1 i 10 attributi più importanti di un prodotto, tratta da [5]*

E' evidente come l'affidabilità (*reliability*), intesa qui sopra come durata nel tempo e la manutenibilità (*maintainability*), intesa qui sopra come facilità nella riparazione, siano caratteristiche molto significative nella valutazione d'acquisto di un prodotto da parte del cliente. Essa è strettamente associata alla qualità di un prodotto ed è spesso considerata un sottoinsieme della qualità. Perciò in sintesi, al fine di raggiungere la qualità di un prodotto come la misura in cui questo soddisfa i requisiti dei clienti, l'affidabilità è certamente un punto focale su cui prestare attenzione.

## 1.2 Dependability

Dimostrazione del legame tra affidabilità e qualità, è proprio la normativa a cui si è fatto riferimento finora, che considera l'affidabilità nel termine tecnico inglese *dependability*, all'interno della sezione dedicata ai termini e definizioni che si applicano a tutta la gestione della qualità e ai QMS standard sviluppati dall'ISO/TC 176 e altri QMS standard basati su queste norme, al momento della pubblicazione. Qui sotto la definizione all'interno della normativa:

### ***Dependability***

*“ability to perform as and when required”*



Il termine è ripreso dalla norma IEC 60050-192, *International electrotechnical vocabulary* ed è un attributo generico sintesi di altri termini. Qui se ne presentano tre di maggiore importanza tra cui proprio la definizione di affidabilità in senso stretto. Su quest'ultimo ci si soffermerà con particolare attenzione.

### ***Maintainability***

La probabilità che un componente o un sistema guasto venga ripristinato o riparato a una condizione specifica entro un periodo di tempo in cui la manutenzione viene eseguita in conformità con le procedure prescritte [5].

### ***Availability***

La probabilità che un componente o un sistema svolga la sua funzione richiesta in un dato momento quando utilizzato nelle condizioni operative stabilite [5].

### ***Reliability***

La probabilità di un prodotto o sistema di performare come richiesto, per un periodo di tempo specificato, in determinate condizioni di esercizio [5].

Quando si acquista un prodotto ci si aspetta che funzioni come previsto, cioè che non fallisca nella sua missione ossia in altre parole che non si verifichino dei guasti. Si introduce quindi il concetto di *failure mode* (modo di guasto) ossia modo in cui si manifesta la perdita di funzionalità [8]. Si prenda in considerazione il tipo di sistema analizzato (quest'ultimo termine generico utilizzato in modo da applicare la definizione a tutti la varietà di prodotti, sottosistemi e apparecchiature). I modi di guasto sono definiti in relazione al tipo di funzione del prodotto, che viene solitamente dichiarata dal produttore sotto forma di specifiche tecniche del prodotto, schede tecniche e documenti operativi. Tuttavia i guasti sono tipicamente eventi casuali e probabilistici, di cui non si conosce l'esatto processo fisico-chimico, a maggior ragione quando questi sono causati da eventi esterni a sua volta casuali di cui se ne può fare al massimo una previsione (terremoti, nubifragi...). Perciò, in quanto occorre avere dal punto di vista dell'analisi ingegneristica una definizione quantitativa che sia pratica e operativa, si definisce l'affidabilità come probabilità.

Importante è anche definire l'intervallo di tempo specificato. Ad esempio si può far riferimento ad un periodo segnato sul calendario, all'ora dell'orologio, o al tempo di funzionamento o sui cicli operativi. L'affidabilità di un prodotto dipende poi dalle condizioni che vengono imposte, quelle di utilizzo (tensioni, pressione, ecc) e ambientali (temperatura, umidità, vibrazioni, altitudine, ecc). Queste condizioni si verificano durante l'intero ciclo di vita del prodotto, compresi la produzione, il trasporto, lo stoccaggio e l'uso operativo [3] e [6].

### **1.3 Nascita e storia recente**

La storia vede la nascita dell'ingegneria dell'affidabilità nel secondo dopoguerra, agli inizi degli anni 50'. Si potrebbe pensare a due eventi che hanno fatto da presupposti per l'avvento di tale disciplina ossia la probabilità e la statistica, e la produzione di massa. La tradizione vede *Blaise Pascal* e *Pierre de Fermat* come padri della teoria della probabilità a seguito di uno scambio epistolare nel 1654, riguardo ad una sfida lanciata a Pascal da un nobile francese interessato al gioco d'azzardo. Successivamente sarà *Laplace* nel 1812, ad introdurre una serie di nuove tecniche estese a numerosi problemi pratici diversi dal gioco come, dati demografici, stima della popolazione o assicurazioni sulla vita. L'affermarsi della produzione di massa avvenuta intorno al 1910 con Henry Ford con la sua auto modello T, ha sicuramente dato grande spinta e ha favorito la ricerca per quanto riguardo lo studio dell'affidabilità. Difatti la produzione di massa consiste nella produzione di beni in grandi volumi a partire da componenti standardizzate, dunque era necessaria una nuova disciplina che affrontasse il problema della qualità, non più nel singolo prodotto, ma nel nuovo contesto di una produzione ad alto volume. Ciò che però portò al consolidarsi dell'ingegneria dell'affidabilità come nuova materia scientifica, fu l'utilizzo essenziale del tubo a vuoto durante la seconda guerra mondiale. Il tubo a vuoto fu inventato dall'americano *Lee de Forest* nel 1906 e diede avvio ad una vera e propria rivoluzione nel campo dell'elettronica. Permise l'impiego di una serie di applicazioni quali la radio, il radar e molte altre. Per tali invenzioni ha contribuito in modo decisivo alla vittoria degli Alleati durante la seconda guerra mondiale, tuttavia era il principale componente soggetto a guasti nelle apparecchiature e spesso bisognava apportarne la sostituzione. Così nel dopoguerra il dipartimento della difesa americano si interessò nella ricerca di questi guasti, per

rendere il tubo a vuoto più efficiente e meno esposto a rischi. Gli studi sfociarono nella nascita dell'ingegneria dell'affidabilità. Non vi è una data precisa ma vi furono una serie di particolari eventi durante gli anni 50' che dimostrarono l'avvento di una nuova disciplina scientifica. Primo tra tutti la pubblicazione nel 1952 di un rapporto intitolato "Termini di interesse nello studio dell'affidabilità" da parte dell'*Aeronautical Radio Inc (ARINC)* a seguito di un contratto stipulato con la Marina per raccogliere informazione sui guasti dei tubi a vuoto, nel tentativo di fornire raccomandazioni ai produttori per migliorarne l'affidabilità. Il rapporto ha svolto un importante ruolo nella definizione dell'affidabilità in termini di probabilità, nonostante la diffusa titubanza in quegli anni nell'utilizzo della statistica e della probabilità tra i metodi scientifici per la progettazione e produzione di nuovi prodotti (negli anni 30' fu messo in cattiva luce il lavoro dello stesso *Shewhart* citato prima). Successivamente si tenne nel 1954 la prima conferenza sul controllo di qualità e l'affidabilità (dell'elettronica) di cui oggi ne detiene l'eredità la rivista *IEE Transactions on Reliability*. Due anni più tardi, nel 1956, la *Radio Corporation of America (RCA)*, uno dei principali produttori di tubi a vuoto, pubblicò un importante rapporto sulle tecniche di previsione dell'affidabilità intitolato "Analisi dello stress di affidabilità per apparecchiature elettroniche". Il rapporto noto come TR-1100, presentava modelli analitici per il calcolo dei tassi di guasto dei componenti. Infine, la più importante tra gli accadimenti, è la pubblicazione nel 1957 di un rapporto da parte del gruppo consuntivo sull'affidabilità delle apparecchiature elettroniche (AGREE), istituito nel 1952 tra il dipartimento della difesa e l'industria elettronica americana. Il rapporto affronta definitivamente il problema dell'affidabilità, fornendo misure per rendere più affidabili le attrezzature, aiuto nell'implementazione di programmi di affidabilità, ed una vera e propria educazione sull'affidabilità. Negli anni 60' l'ingegneria dell'affidabilità ha conosciuto una maggiore specializzazione ed una transizione dall'attenzione all'affidabilità dei singoli componenti alle caratteristiche a livello di sistema. Negli anni 70' si è visto un aumento dell'interesse per l'affidabilità di sistemi complessi come le centrali nucleari e l'affidabilità del software a causa della sua crescente diffusione [7]. Dall'inizio del secolo, gran parte della ricerca sull'affidabilità è passata dal settore militare all'industria e al mondo accademico (sempre più università insegnano l'affidabilità). Ciò è particolarmente vero per i produttori del settore automobilistico per competere sul mercato internazionale con prodotti sempre più

efficienti. L'affidabilità, è in questi ultimi anni una preoccupazione primaria che le aziende devono considerare per partecipare ad un'economia globale [5].

## ❖ 2. Metodi per l'analisi dell'affidabilità

In questo capitolo, dopo una breve introduzione sull'importanza dell'affidabilità nella progettazione meccanica, vengono presentate in sintesi la normativa EN IEC 60300-3-1:2004 *Dependability Management Part 3-1: Application guide - Analysis techniques for dependability – Guide on methodology* e la normativa EN IEC 60812: 2018 *Failure modes and effects analysis (FMEA and FMECA)* (quest'ultima però in modo più approfondito), che trattano, le principali tecniche di analisi dell'affidabilità, la prima, la descrizione di come funziona e come si svolge il metodo FMEA, la seconda.

### 2.1 Importanza dell'affidabilità nella progettazione meccanica

Dalla storia si è appurato come l'ingegneria dell'affidabilità sia una disciplina relativamente recente, tuttavia oggi è una “scienza” ben consolidata grazie alla ricerca e agli studi accademici. Sono diversi fattori che contribuiscono, come l'aumentare della complessità e sofisticazione dei sistemi, la volontà del cliente nell'avere sempre più prodotti innovativi con alte prestazioni qualitative, e l'incidenza dei costi a seguito del rilevarsi di guasti e dalle conseguenti riparazioni [5]. Un problema però, è che l'analisi dell'affidabilità stessa rischia di essere gravosa dal punto di vista economico proprio perché la ricerca di sistemi sempre più complessi con elevate prestazioni, comportano un bisogno maggiore in termini di affidabilità. Spesso si parte lavorando su tecnologie e materiali già esistenti e nel tentativo di apportare qualche accorgimento per aumentare i limiti di prestazioni, si hanno costi importanti. La soluzione ideale è sempre quella di introdurre nuove tecnologie che sebbene inizialmente comportino costi elevati di affidabilità, a lungo termine permettono di ottenere prestazioni elevate e costi minori. Si potrebbe anche auspicare ad una affidabilità minore ma nel contempo usufruire di una politica manutentiva che garantisca tempi di inattività minori ed un'ampia disponibilità del prodotto [6]. L'impatto dei guasti di sistemi varia da disagi e costi minori a lesioni personali, perdite economiche significative e in alcuni casi addirittura la morte. Il produttore perciò può anche essere ritenuto responsabile dal punto di vista giuridico-civile per non aver tenuto conto della sicurezza e dall'affidabilità del prodotto. Gli ingegneri responsabili della progettazione devono includere l'affidabilità come criterio di progettazione. Durante

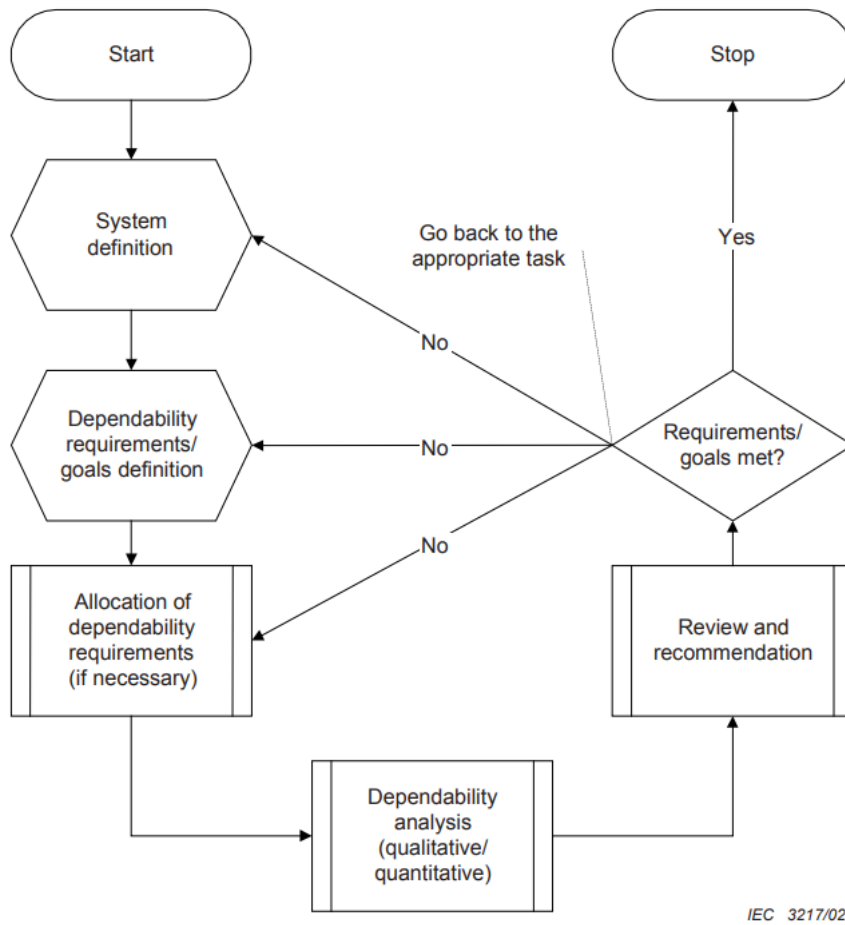
quest'attività esistono diversi modi per migliorare l'affidabilità del prodotto ed aumentarne il valore [5].

## **2.2 La normativa EN 60300-3-1:2004 *Dependability Management Part 3-1: Application guide - Analysis techniques for dependability – Guide on methodology.***

A tal proposito si faccia riferimento alla normativa EN 60300-3-1:2004 *Dependability Management Part 3-1: Application guide - Analysis techniques for dependability – Guide on methodology*. Lo scopo di questa normativa viene detto essere quello di descrivere le tecniche più diffuse per l'analisi dell'affidabilità, evidenziandone vantaggi e svantaggi, input, e altri vincoli. Nasce per fornire le informazioni necessarie per scegliere i metodi di analisi più appropriati. Già nelle prime pagine viene presentata una procedura generale nell'analisi dell'affidabilità. (Figura 2.2.1) Quest'ultima consiste nei seguenti passi:

- a) Definizione del sistema ( funzionamento, interfacce, interazioni con l'ambiente).
- b) Definizione dei requisiti di affidabilità, disponibilità, manutenibilità, nonché specifiche funzionali e criteri di identificazione dei guasti.
- c) Allocazione dei requisiti di affidabilità ai sotto-sistemi che costituiscono il sistema.
- d) Analisi dell'affidabilità (qualitativa o quantitativa).
- e) Verifica del raggiungimento dei requisiti prefissati ed identificazione di metodi di miglioramento.

## General procedure



**Figura 2.2.1** procedura generale nell'analisi d'affidabilità tratta da [8]

I metodi presentati in questo standard sono divisi in due macro categorie:

- 1) Metodi utilizzati principalmente per l'analisi dell'affidabilità
- 2) Metodi di ingegneria generale che supportano l'analisi dell'affidabilità o aggiungono valore alla progettazione per affidabilità.

I metodi utilizzati principalmente per l'analisi dell'affidabilità possono essere a loro volta classificati nelle seguenti categorie in relazione alla loro finalità principale

- 1) Metodi per evitare i guasti
- 2) Metodi per l'analisi dell'architettura e la valutazione dell'affidabilità in termini di allocazione, tra questi vi sono:

### **I metodi bottom-up:**

Questi metodi operano a partire dai modi di guasto a livello del singolo componente. Dal tipo di guasto se ne deduce l'effetto sulla performance. Una volta effettuata l'analisi per ogni componente di base, si procede ad analizzare gli assiemi nello stesso modo, fino a considerare il sistema nel suo complesso. Per come operano, sono sistemi detti "a guasto singolo" [9].

### **I metodi Top-down:**

Questi metodi partono invece dalla identificazione di un evento indesiderabile a livello del sistema, per poi risalire alle sue cause scomponendo il sistema in sotto-livelli. Per come operano, possono identificare guasti che presentano cause molteplici ed eventualmente correlate [9].

Nel caso in cui si voglia distinguere tra metodi che operano ad eventi indipendenti o dipendenti nel tempo si ottiene la suddivisione mostrata in tabella.

<b>Sequence dependent</b>	Event-tree analysis	Markov, Petri, truth table
<b>Sequence independent</b>	FMEA, HAZOP	FTA, RBD
	<b>Bottom-up (single fault)</b>	<b>Top-down (multiple faults)</b>

**Tabella 2.2.** suddivisione dei metodi, tratta da [8]

Poiché nessun metodo di analisi è portato ad affrontare tutte le complessità del caso, spesso si affiancano metodi di analisi top-down e bottom-up che siano complementari in modo da garantire un'analisi esaustiva.

### 3) Metodi per la stima di misure di eventi elementari

Prima di presentare in sintesi i diversi metodi la normativa precisa come, la scelta del metodo da implementare, dipende dal caso analizzato, perciò non vi è una linea guida generale. La selezione, viene effettuata da uno sforzo congiunto di esperti nel campo dell'ingegneria e dell'affidabilità. Tra i metodi proposti e riassunti nella normativa, si vuole soffermarsi su uno in particolare, ovvero il metodo *Failure Modes and Effects Analysis (FMEA)*, tecnica tra le più conosciute e utilizzate per l'analisi dell'affidabilità.



Nella normativa, come appena detto, se ne presenta una sintesi. Si trova in ordine: una breve descrizione e lo scopo, l'applicazione, gli elementi chiave, i benefici, i limiti, lo standard di riferimento e infine viene mostrato un esempio applicativo. Tale metodologia verrà adesso discussa e presentata in dettaglio, e per fare ciò si utilizzerà proprio lo standard di riferimento: la normativa EN IEC 60812: 2018 *Failure Modes and Effects Analysis* (FMEA and FMECA).

### **2.3 EN IEC 60812: 2018 *Failure Modes and Effects Analysis* (FMEA and FMECA)**

Già dalle prime righe dell'introduzione della normativa, viene esplicitato il significato e la funzione di questa metodologia:

*“Failure modes and effects analysis (FMEA) is a systematic method of evaluating an item or process to identify the ways in which it might potentially fail, and the effects of the mode of failure upon the performance of the item or process and on the surrounding environment and personnel.”*

E' bene avere chiaro fin da subito il significato di alcuni termini. La terminologia utilizzata a livello normativo non è figlia del caso ma viene appositamente selezionata nel modo più appropriato e coerente possibile, in relazione al tipo di contesto e ambito di discussione. Qui di seguito in elenco, i termini più importanti, richiamati spesso all'interno della normativa.

***Failure mode:*** *manner in which failure occurs*

***Failure effect:*** *consequence of a failure, within or beyond the boundary of the failed item*

***System:*** *combination of interacting elements organized to achieve one or more stated purposes*

***Item:*** *subject being considered*

***Process:*** *set of interrelated or interacting activities that transforms inputs into outputs*

Questa tecnica fu inizialmente introdotta dalla NASA nel 1963 per migliorare i requisiti di sicurezza e affidabilità di prodotti e processi. Da allora ha riscosso particolare

interesse nel settore aereo spaziale, nucleare e automobilistico [10]. In generale la FMEA, scompone il sistema in sottosistemi a livello del singolo componente e valuta il modo in cui questi possano guastarsi e in che modo tale guasto può incidere a livello locale o globale. La finalità è quella di offrire supporto agli esperti nelle decisioni per ridurre la probabilità di guasto e le relative conseguenze. Permette quindi di migliorare l'affidabilità, ridurre l'impatto ambientale, ridurre i costi di fornitura e operativi, e migliorare la reputazione dell'impresa. La FMEA può essere adattata per incontrare le esigenze di qualsiasi settore o organizzazione e può essere personalizzata e applicata in diversi modi a seconda degli obiettivi; è applicabile all'hardware, al software, ai processi, all'azione umana e alle loro interfacce, in qualsiasi combinazione. Si può utilizzare la metodologia in un processo di certificazione o garanzia; la si può utilizzare ad esempio nell'analisi della sicurezza a fini normativi ma poiché si tratta di uno standard generico, essa non riguarda specificamente la sicurezza [11]. La FMEA può essere svolta durante varie fasi del ciclo di vita di un prodotto, tuttavia a noi interessa l'analisi preliminare che ne viene fatta durante le prime fasi di progettazione e pianificazione. Il documento fornisce una linea guida generale su come pianificare, eseguire, documentare e gestire una FMEA. (Figura 2.3.1) Vengono individuate dunque tre fasi sequenziali (Pianificazione, Esecuzione, Documentazione) e ogni fase si articola in più punti. Si tratta di un flusso di attività normalmente svolte in sequenza ma con la possibilità di interazioni tra queste o addirittura l'esclusione di qualcuna che non viene eseguita. Dipende dal caso preso in considerazione. Si vedano le tre fasi, commentando in modo sintetico le relative attività in base a quanto detto nella normativa.

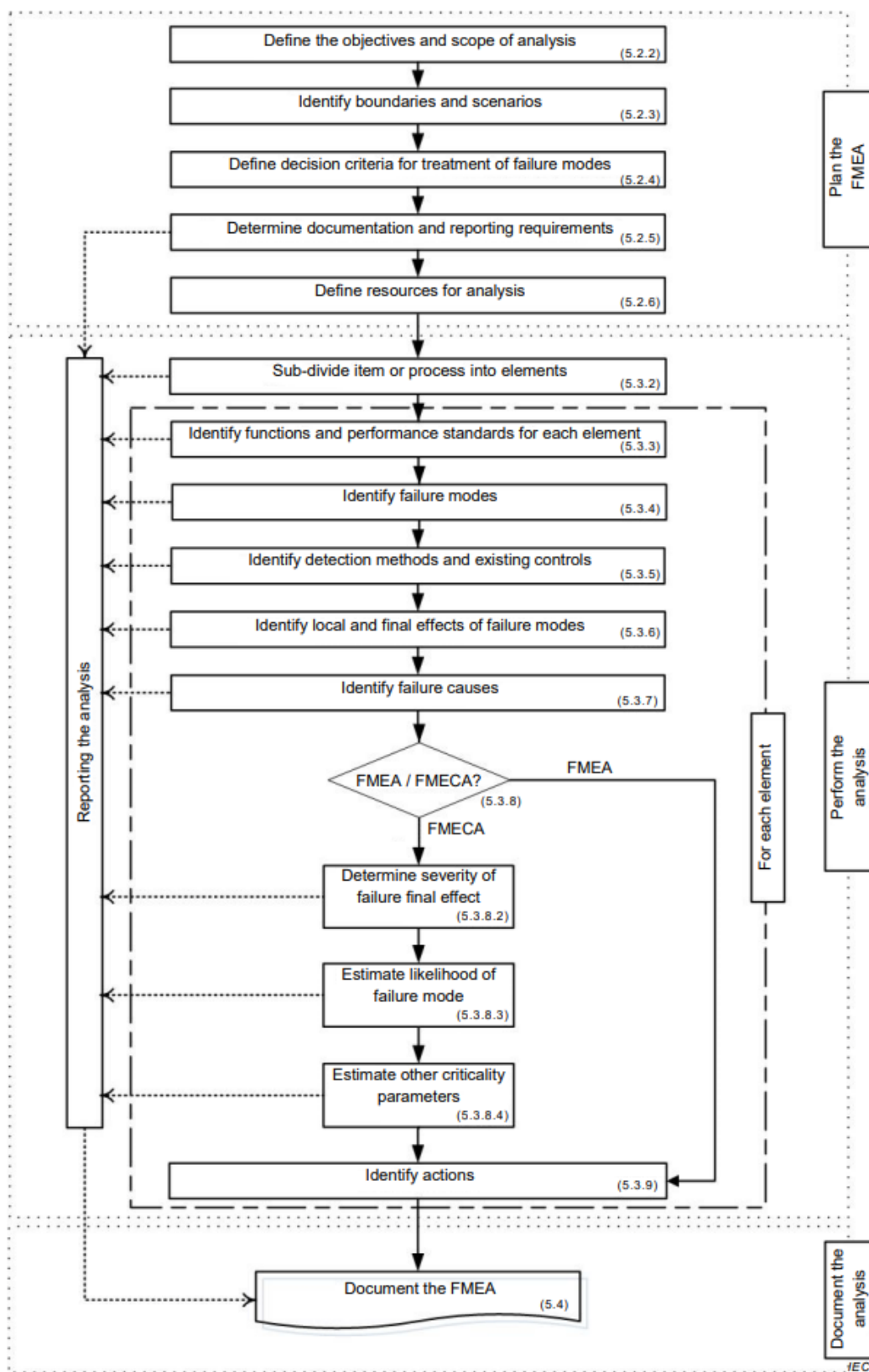


Figura 2.3.1 schema della procedura generale di una FMEA tratta da [11]

### 2.3.1 Pianificazione:

- 1) *Definizione degli obiettivi e scopo dell'analisi:* pone le basi per l'analisi e informa su quali sono gli obiettivi da raggiungere con i risultati dell'analisi.
- 2) *Identificazione dei confini e degli scenari:* vengono descritti l'oggetto dell'analisi, i suoi confini e le sue condizioni d'uso per assicurarsi che chi ne faccia uso comprenda l'ambito dell'analisi. Questa descrizione dovrebbe mostrarsi più dettagliata con l'avanzamento della pianificazione, includendo diagrammi o riferimenti a documenti dove le informazioni possono essere trovate. Per sistemi complessi si dovrebbe apportare una suddivisione in componenti, usando requisiti fisici o funzionali o organizzativo/contrattuali, e applicare per ognuno l'analisi. Quest'ultime devono essere logicamente connesse, per poter poi valutare il sistema nel suo insieme (presupposto dei metodi bottom-up). Particolare attenzione deve essere prestata alle interfacce tra i sottosistemi e i confini che li separano.
- 3) *Definizione dei criteri decisionali per il trattamento dei guasti:* vengono stabiliti i criteri per decidere quali guasti richiedono un trattamento e quali sono le azioni prioritarie prima di intraprendere l'analisi. I criteri tengono conto degli obiettivi, e dei requisiti legali o contrattuali, consentendo una selezione che sia coerente e motivata. Per i guasti che sono rilevanti e che hanno quindi una certa priorità, devono essere definite le conseguenze (ambientali, economiche, fisiche o psicologiche a livello umano, reputazione). E' l'impatto (*severity*) relativo a quest'ultime, gli obiettivi e le funzioni del sistema, benefici e costi del trattamento, le variabili considerate nella decisione.
- 4) *Determinare i requisiti di documentazione:* L'obiettivo è quello di documentare in modo logico tutte le informazioni rilevanti e utilizzate durante la FMEA (descrizione del sistema, ambito e confini, criteri usati, ipotesi formulate, descrizione chiara della metodologia alla base dell'analisi, stakeholders coinvolti, fonti di dati ecc). Il report dev'essere fatto in conformità degli standard e delle procedure dell'organizzazione tenendo conto degli obiettivi. La documentazione, fatta durante l'esecuzione, può essere una combinazione di banche dati, documenti elettronici e relazioni cartacee. I mezzi utilizzati devono

essere definiti. La documentazione viene periodicamente aggiornata se i lavori di progettazione progrediscono e nuove informazioni sono disponibili, poiché sarà di vitale importanza per l'implementazione di progetti futuri (sono costi significativi per l'azienda).

- 5) *Definizione delle risorse per l'analisi*: le principali risorse sono le informazioni relative a funzioni, caratteristiche e prestazioni di tutti gli oggetti e processi dell'analisi, personale con competenze e abilità tecniche e autorità per eseguire la FMEA, risorse fisiche quali sale riunioni, supporti audiovisivi per riunioni virtuale e sistemi informativi condivisi, per permettere la comunicazione tra team o stakeholders reali o virtuali. I criteri per selezionare quest'ultimi sono costo, efficacia, utilità e tempestività dei risultati.

### **2.3.2 Esecuzione:**

- 1) *Scomposizione dell'oggetto o del processo in elementi base*: L'oggetto dell'analisi viene suddiviso in elementi semplici. Il livello di dettaglio appropriato per l'analisi dipende dal contesto e dai risultati voluti. E' chiaro come un'analisi con maggior dettaglio richieda più tempo.
- 2) *Definizione della funzionalità e delle prestazioni di ogni elemento*: Vengono dichiarate tutte le funzioni di ciascun elemento. Ciascuna funzione di un elemento deve essere considerata separatamente nell'analisi. Per ogni funzione identificata deve poi essere definita il livello di prestazione, in modo inequivocabile e quantitativamente, per essere in grado di identificare le modalità di guasto.
- 3) *Identificazione delle modalità di guasto*: Devono essere definite le modalità in cui un elemento fallisce nel soddisfare le proprie prestazioni (quelle rilevanti per gli obiettivi dell'analisi). Un elemento potrebbe avere diverse modalità di guasto, tuttavia ciascuna deve essere registrata separatamente.
- 4) *Identificazione dei metodi di identificazione del guasto e dei sistemi di controllo implementati*: I primi sono i mezzi per identificare la modalità di guasto (spie o allarmi; indicatori, calibri o monitoraggio; test di affidabilità durante lo sviluppo; processo di controllo statistico; ispezioni; ecc), mentre i secondi sono misure utilizzate per prevenire o ridurre la probabilità che si verifichino i guasti

- e mitigarne gli effetti (elementi ridondanti o sistemi di back-up che consentono il funzionamento continuo se uno o più elementi falliscono; politiche manutentive; ecc).
- 5) *Identificazione delle conseguenze del guasto a livello locale e globale:* Si identificano in modo dettagliato gli effetti delle modalità di guasto. Questi possono presentarsi a livello locale (influenzano la funzione del singolo elemento o processo) o a livello globale (conseguenze importanti, ad esempio, relative alla sicurezza, o ambientali che colpiscono il sistema nel suo complesso). Lo stesso effetto potrebbe essere causato da una o più modalità di guasto di uno o più elementi o processi. Si potrebbero anche individuare effetti a livelli intermedi (tra il locale e il globale). Spesso sono classificati in gruppi a seconda della gravità o della natura, per semplificare l'analisi. Solitamente non vengono identificati effetti derivanti da molteplici guasti.
  - 6) *Identificazione delle cause:* Si cerca di capire come si verifica il guasto perché d'aiuto nel trattamento dei modi di guasto. Non vi è un metodo per una vera e propria analisi causale; in alcuni casi può bastare identificare l'aspetto fisico, logico o psicologico del guasto.
  - 7) *Valutare l'importanza relativa delle modalità di guasto:* Si tratta di definire delle priorità per quanto riguarda l'importanza delle modalità di guasto. Tale procedura può essere effettuata sia come parte dell'analisi di ciascun guasto e dall'analisi del guasto per i suoi effetti, che dopo l'identificazione di tutte le modalità di guasto. Si ottiene un elenco di tutte le modalità di guasto in ordine di priorità. Le priorità per l'azione devono considerare anche il costo effettivo dei trattamenti disponibili, la facilità con cui possono essere implementati e il modo in cui influenzano le altre parti del sistema.
  - 8) *Identificazioni delle azioni:* A seconda dell'ambito della FMEA, devono essere identificate, valutate e documentate le possibili azioni per il trattamento dei modi di guasto che lo richiedono. Le ragioni per richiedere o no un trattamento si basano sui criteri di identificazione dei guasti. Le azioni individuate devono essere intraprese con un livello di accuratezza e precisione, coerente con i metodi e fattori utilizzati per determinare l'importanza delle modalità di guasto.

### 2.3.3 Documentazione:

L'analisi deve essere opportunamente documentata (si deve comporre un report) come indicato al punto 4 della pianificazione.

### 2.3.4 Risk Priority Number

Si è detto come sia possibile classificare le modalità di guasto relativamente alla loro importanza. Quest'ultima può essere misurata considerando esclusivamente la gravità dei guasti, oppure è possibile considerare la combinazione di questa con altre misure di altri parametri (non solo l'effetto del guasto, ma anche la probabilità che si verifichi e nel caso del *risk priority number*, la rilevabilità del guasto), ottenendo quella che viene detta essere un'analisi di criticità. Nel caso si decida di eseguire tale operazione durante l'analisi, il metodo viene definito *failure modes, effects and criticality analysis* (FMECA). All'interno della normativa vengono descritti 4 metodi di criticità: la matrice di criticità, il diagramma di criticità, il *risk priority number* e il *risk priority number* alternativo. Ai fini della presentazione, si discuterà sull'utilizzo del *risk priority number*. Il *risk priority number* si deriva dalla combinazione di valutazioni semi-quantitative su scale ordinate. Si tratta del prodotto di tre punteggi relativi a *severity* (S), *occurrence* (O) e *detectability* (D). Rispettivamente questi parametri stimano la gravità e la pericolosità dell'effetto dato da un guasto (*severity*), la possibilità che la causa della modalità di guasto si verifichi (*occurrence*) e la probabilità che i metodi di controllo previsti siano in grado di rilevare il potenziale modo di guasto del componente (*detectability*).

$$RPN = O \times D \times S$$

Per la misurazione dei tre parametri si utilizzano solitamente scale di valutazioni ordinali da 1 a 10 producendo valori RPN complessivi che vanno da 1 a 1000. I numeri S, O, D, sono determinati utilizzando le tabelle di valutazione in cui i livelli per ogni parametro sono associati ad una frase descrittiva che supporta l'analista nella scelta del punteggio. (Tabelle 2.3.4.1-2-3) Per quanto riguarda la valutazione di D è facile intuire come, più alta è la valutazione, minore è la probabilità di rilevare il guasto e dunque più facile che esso si verifichi (perché non rilevato dai sistemi di controllo) e il suo effetto

ricada sul componente. Una volta ottenuti i punteggi per l’RPN, le modalità di guasto sono ordinate rispetto a tale valore e viene data la priorità d’azione più elevata al valore di RPN più elevato. L’ordine è influenzato dal modo in cui sono definite le scale.

Severity rating (S)	Description
1	No effect on power generation; visit required in next 14 days; warning alarm not causing turbine to stop; possibly caused by component failure.
2	Short loss of power generation; visit required in next 14 days; turbine shutdown but remotely resettable; possibly caused by component failure.
:	:
8	Loss of power generation over longer period (2 to 4 weeks); replacement of significant component requiring service vessel.
9	Loss of power generation over prolonged period (more than four weeks); replacement of significant component requiring major service vessel.
10	Safety incident; loss of whole structure; total loss of production for several months.

*Tabella 2.3.4.1 tabella per la valutazione di severity di una turbina eolica tratta da [11]*

Detectability rating (D)	Description
1	The failure mode will always be discovered before consequences come into effect.
2	The failure mode is apparent and will normally be discovered before consequences come into effect.
:	:
8	The failure mode can only be discovered by checks e.g. by sample inspections.
9	The failure mode is hard to discover and will therefore almost inevitably come into effect.
10	The features cannot be checked and the failure mode cannot be detected, e.g. inaccessible.

*Tabella 2.3.4.2 tabella per la valutazione di detectability di una turbina eolica tratta da [11]*

Occurrence rating (O)	Description
1	Failure mode occurs once in 10 000 machine years.
2	Failure mode occurs once in 2 000 machine years.
:	:
8	Failure mode occurs once a year per machine.
9	Failure mode occurs once every 4 months per machine.
10	Failure mode occurs once a month per machine.

*Tabella 2.3.4.3 tabella per la valutazione di occurence di una turbina eolica tratta da [11]*



## ❖ 3. Applicazione della logica Fuzzy all'ingegneria dell'affidabilità

In questo capitolo, partendo dai limiti della FMEA nell'utilizzo del *risk priority number*, viene proposta come soluzione la *fuzzy logic*. Dapprima si introducono i concetti di *Fuzzy Set Theory* e *Possibility Theory*, successivamente si vede come questa tecnica è integrata e utilizzata all'interno della FMEA, dando vita a quello che è chiamato essere l'approccio *Fuzzy-FMEA*.

### 3.1 Limiti e svantaggi della FMEA

L'utilizzo della FMEA con le valutazioni dei guasti basate sull'utilizzo del *Risk Priority Number* trova grande applicazione nell'ambito ingegneristico per la produzione e progettazione industriale per via della sua precisione e facilità d'uso, ma vi sono dei limiti. Già nella normativa [11], per quanto riguarda l'utilizzo del RPN, si sottolinea come i rapporti numerici tra i valori non hanno un significato specifico. Nell'analisi RPN è possibile a volte ottenere modalità di guasto riportanti lo stesso identico valore numerico, tuttavia i due numeri potrebbero essere risultati di prodotti di valori diversi di S, O e D, e quindi la valutazione del guasto non essere la stessa. La normativa [11] in questo caso dice di preferire l'indice RPN con S maggiore. In linea generale però, tra i tre indici non ve n'è uno più importante dell'altro, perché questi appaiono solamente come dei numeri ponderati e comprensibili all'interno della propria scala di valutazione ma privi di significato che li qualifichi in un contesto più ampio nella relazione con gli altri parametri. Così si potrebbe pensare a tre criteri con conseguenze simili ma ciò non si verifica nella realtà [12]. Inoltre è difficile determinare i tre fattori proprio a causa della quantificazione soggettiva su scale da 1 a 10 [13]. Per superare questi svantaggi si può accostare la FMEA e l'uso convenzionale dell'indice RPN ad una nuova e recente tecnica, la *fuzzy logic* che si basa sulla *Fuzzy Set Theory*.

## 3.2 Fuzzy Logic

Nella teoria dei sistemi, la logica fuzzy, è un tipo di rappresentazione ideato verso la fine degli anni 1970 da Lofti Aliasker Zadeh, ingegnere e matematico persiano naturalizzato statunitense, presso l'University of California a Berkeley. La logica, ha tra i diversi obiettivi quello di rappresentare il più fedelmente possibile, su sistemi a logica binaria, il modo di ragionare tipico della mente umana. Il ragionamento umano ammette, infatti, la possibilità di passare da un concetto a un altro gradualmente, mentre ciò non è possibile nella logica booleana, in cui la definizione stessa di insieme ordinario comporta che l'appartenenza di un elemento a un insieme, corrisponda a un concetto binario, potendo assumere i due soli valori 1 o 0 [14]. La logica fuzzy si basa sulla definizione di insieme fuzzy (*fuzzy set*), l'idea era quella, scrive Zadeh, di fornire un comodo punto di partenza per la costruzione di un quadro concettuale che per molti aspetti è parallelo al quadro utilizzato nel caso degli insiemi ordinari, ma è più generale di quest'ultimo [15]. La volontà primaria era quella perciò di affrontare un quadro più ampio dove anche l'incertezza intesa qui come risultato dall'assenza di criteri definiti di appartenenza ad una classe, e non dalla presenza di variabili casuali (probabilità) o dalla mancanza di conoscenza di un certo parametro (come nell'analisi di tolleranza), potesse essere trattata rigorosamente e con precisione. Modellare l'incertezza tuttavia non è facile poiché non è facile definire l'incertezza; essa dipende dalle cause che la scaturiscono, dalle informazioni disponibili, dalle esigenze dell'osservatore, ecc. In base alle circostanze il tema potrebbe essere definito e trattato con modelli diversi da quello dell'insiemi *fuzzy*. L'elaborazione di questa teoria è recente, e molti autori hanno contribuito nello studio e nella ricerca. Nel 1984 esistevano già 4000 pubblicazioni e nel 2000 erano già più di 30000 [15].

## 3.3 Fuzzy Set Theory

Veniamo dunque ora alla definizione formale di un *fuzzy set*. Rispetto alla definizione di insieme ordinario dove un elemento appartiene o non appartiene ad un determinato insieme, nel caso venga considerato un insieme *fuzzy*, gli elementi hanno un grado di appartenenza che contempla simultaneamente l'esserci e il non esserci; questo

permettere di rappresentare l'intera gamma di colori tra due estremi, consentendo un passaggio graduale e progressivo tra i due. Dunque, ai concetti logici di vero e falso della logica convenzionale si sostituisce un grado di verità che presuppone allo stesso tempo un grado di falsità [14]. Se  $X$  è una raccolta di elementi indicati generalmente con  $x$ , allora un insieme fuzzy  $A$  in  $X$  è un insieme di coppie ordinate:

$$A = \{(x, \mu(x)) | x \text{ appartiene a } X\}$$

Dove  $\mu(x)$  è chiamata funzione di appartenenza o grado di appartenenza di  $x$  in  $A$  che mappa  $X$  allo spazio di appartenenza  $M$ , sottoinsieme dei numeri reali non negativi compreso tra 0 (non appartiene completamente) e 1 (appartiene completamente) [15]. Le funzioni di appartenenza possono essere tipicamente trapezoidali, rettangolari o gaussiane. Vista la loro semplicità, le funzioni di appartenenza triangolari sono preferite per le operazioni aritmetiche mentre nel caso di valutazione dei rischi, è preferita la tipologia gaussiana [16].

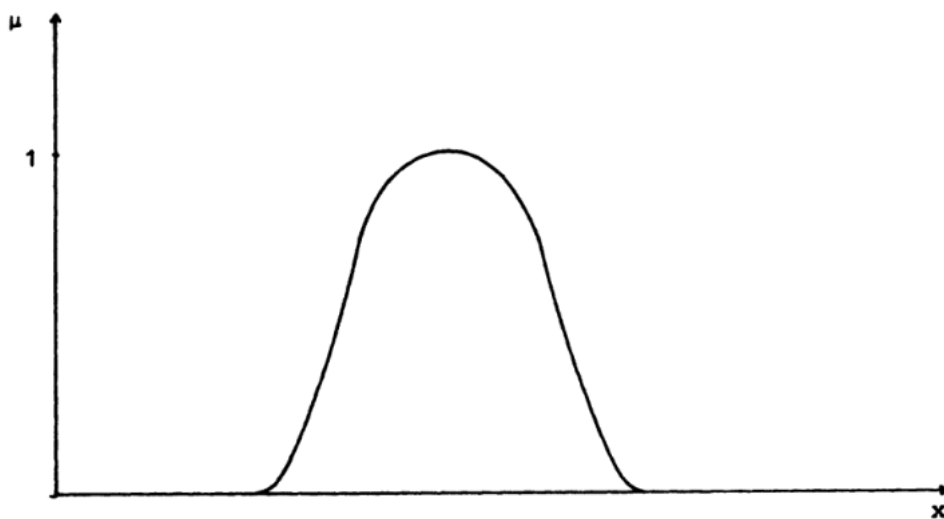


Figura 3.3.1 grafico di una funzione di appartenenza gaussiana tratto da [15]

### 3.4 Possibility Theory

Avente chiaro il concetto di *fuzzy set*, è importante introdurre ora, per quello che si vedrà in seguito, il concetto di *possibility theory*. Mentre un insieme fuzzy fornisce il grado di appartenenza di ogni elemento dell'insieme, la teoria della possibilità fornisce la possibilità che una variabile possa avere un particolare valore [17]. Come si può

capire dal nome, la teoria della possibilità tratta l'incertezza in termini possibilistici più che probabilistici. Pertanto il termine "variabile" viene molto spesso utilizzato in senso linguistico più che strettamente matematico (i suoi valori sono parole o proposizioni piuttosto che numeri). Sebbene differiscano in terminologia, la teoria della possibilità è correlata alla teoria degli insiemi fuzzy. Infatti i diversi significati che può assumere una variabile linguistica, chiamata *term set*, non sono altro che restrizioni del *fuzzy set* i cui valori la variabile rappresenta. Ciascuno di questi costituisce una distribuzione di possibilità sul dominio della variabile [15]. Un esempio è quello di considerare la probabilità di guasto come variabile linguistica i cui termini: remota, bassa, moderata, alta e molto alta, rappresentano restrizioni di un *fuzzy set* i cui valori sono probabilità di guasto. *Zadeh* ha correlato il concetto di restrizione fuzzy a quello di distribuzione di possibilità nel seguente modo:

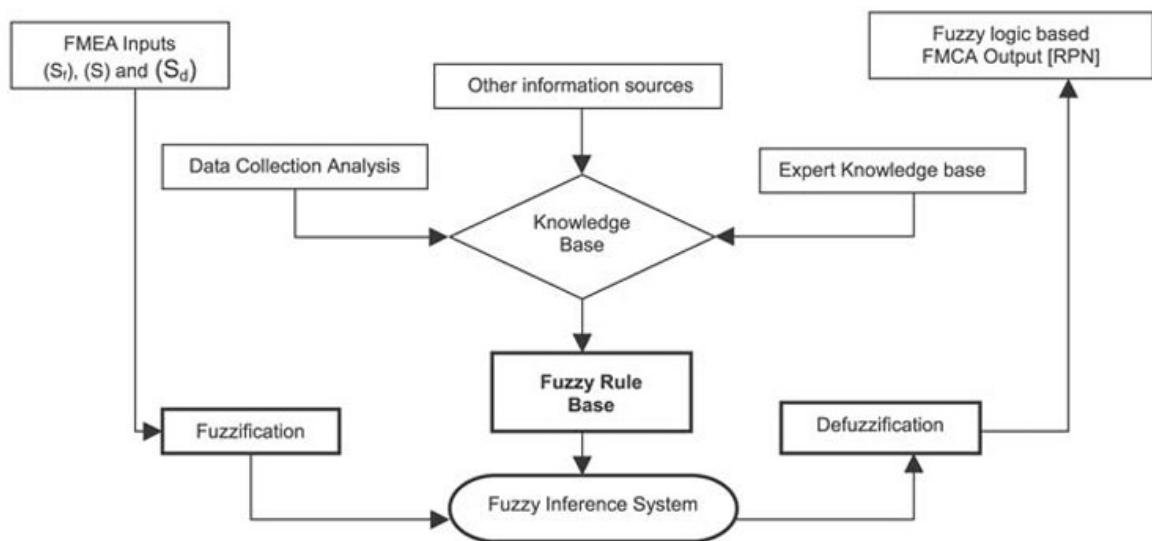
"Consideriamo un'età numerica, diciamo  $u=28$ , il cui grado di appartenenza all'insieme fuzzy "giovane" è circa 0,7. Innanzitutto interpretiamo 0,7 come il grado di compatibilità di 28 con il concetto "giovane". Quindi asseriamo che la proposizione "John è giovane" converte il significato di 0,7 dal grado di compatibilità di 28 con "giovane" al grado di possibilità che John abbia 28 anni, data la proposizione "John è giovane". In breve la compatibilità di un valore  $u$  con giovane si converte nella possibilità di quel valore  $u$  dato "John è giovane" [15].

### **3.4 L'approccio Fuzzy-FMEA**

Uno degli obiettivi della logica fuzzy, è anche quello di compattare tramite variabili linguistiche, una complessità infinita di dati per portarla ad un livello accettabile [15]. Nel suo "Principio della Complessità" *Zadeh* osserva come "All'aumentare della complessità di un sistema, la nostra capacità di prendere decisioni precise e significative sul proprio comportamento, diminuisce fino al raggiungimento di una soglia oltre la quale precisione e significato (o rilevanza) diventano caratteristiche che quasi si escludono a vicenda" [17]. E' il caso dell'ingegneria dell'affidabilità, che deve lavorare oggi con sistemi sempre più complessi, dimostrandosi dunque sempre più necessaria per garantire uno sviluppo produttivo che sia sostenibile. L'affidabilità è così costretta a lavorare nell'incertezza e propone analisi statistiche e modelli approssimativi nel

tentativo di risolverla. La logica fuzzy accetta l'incertezza ed è disposta a trattarla in maniera rigorosa, senza sforzarsi di trovare una precisione dove non è possibile trovarla [17]. Si è perciò cercato negli ultimi periodi, di accostare questa nuova e recente tecnica agli studi affidabilistici nella progettazione ingegneristica di prodotti.

Compresi i concetti alla base della *fuzzy logic*, si passi ora vedere la sua applicazione nell'utilizzo della FMEA come metodo di analisi dell'affidabilità nella progettazione ingegneristica di un componente meccanico. La metodologia classica è di per sé efficace e facile da usare, ma ha comunque dei limiti per quanto riguarda l'utilizzo degli indici RPN, nell'ottenere una priorità d'azione nel trattamento dei modi di guasto. La logica fuzzy permette di andare oltre questi limiti, fornendo un modo più flessibile, [10] coerente e logico per valutare il rischio associato alle modalità di guasto di un componente. I parametri S, O, D, vengono, viene detto in gergo, "*fuzzificati*", utilizzando opportune funzioni di appartenenza per determinare il grado di appartenenza in ogni classe di input. I risultati vengono valutati nel *motore di inferenza fuzzy*, che fa uso di una base di regole ben definite, composta solitamente da regole *If-Then*, e operazioni di logica fuzzy, per determinare il livello di criticità del guasto. L'output del motore di inferenza viene poi, detta in gergo, "*defuzzificato*" per ottenere il *risk priority number*. L'architettura del modello linguistico fuzzy è presentato come in figura (Figura 3.4.1). I principali componenti associati al modello sono: *Fuzzification*; *Fuzzy rule base*; *Fuzzy inference system*; e *Defuzzification*. Si veda ora nel dettaglio la descrizione di ciascuno [10].



*Figura 3.4.1 modello linguistico fuzzy tratto da [10]*

### ***Fuzzification***

La fuzzificazione prevede la trasformazioni di *crisp input*, ossia input che si rifanno alla definizione di insieme classico, in variabili linguistiche i cui termini non sono altro che funzioni di appartenenza che esprimono quanto bene questi input appartengano ai termini linguistici definiti [11]. Le decisioni e le conoscenze specialistiche, possono essere utilizzate per descrivere il grado di funzione di appartenenza per una particolare variabile [12]. Anche la variabile di output, risultato del motore di inferenza, è fuzzificata a livelli (termini linguistici) prima del processo di *defuzzification*.

### ***Fuzzy rule base***

Viene fornita una base di regole ben definita per esprimere la conoscenza ed il giudizio di analisti esperti che conoscono in modo profondo il comportamento di sistemi e i rischi prodotti da diversi tipi di guasto. Si tratta della filosofia di controllo che tratta i parametri in ingresso e che supporta la logica decisionale del motore di inferenza del sistema [14]. Si utilizzano solitamente le regole “If-Then” (se-allora). Un esempio è:

*se  $x$  è  $M$ , allora  $y$  è  $N$*

dove:

- $x$  è la variabile linguistica di input
- $M$  è una delle funzioni definite della variabile linguistica di input
- $Y$  è la variabile linguistica di output
- $N$  è una delle funzioni definite della variabile linguistica di output

Questa procedura è ripetuta per tutte le combinazioni possibili, relativamente al numero di livelli linguistici definiti per ciascuna variabile. Le variabili, sono in totale 4: 3 di input e 1 di output.

### ***Fuzzy inference system***

Il motore di inferenza fornisce l'output *fuzzy risk priority number* (FPRN) (l'indice RPN fuzzificato), a partire dai parametri (variabili input) e dalla conoscenza di base (le regole) in ingresso. L'algoritmo solitamente utilizzato è quello di Mamdani. Esso

prevede una prima parte di implicazione dove per ogni regola sono combinate le relative funzioni di appartenenza di input e output, considerando il grado di appartenenza minore, ottenendo una nuova funzione di appartenenza. Questo set di funzioni viene poi aggregato, tenendo conto questa volta del profilo massimo delle funzioni di appartenenza, per ottenere l'output finale [11].

### ***Defuzzification***

Durante la defuzzificazione l'output fuzzificato (FPRN) viene trasformato in valore numerico interno all'intervallo della grandezza in uscita, già precedentemente normalizzato (RPN) [14]. In questo caso è utilizzato l'algoritmo del centro di gravità, che non fa altro che individuare il centro di massa della funzione di appartenenza (l'output finale). Si può in tal modo stilare una nuova classifica dei modi di guasto a seconda dei valori RPN, e assegnare una più corretta priorità d'azione [11].

## **❖ 4. Casi studio**

In questo ultimo capitolo si presentano 3 casi studio che analizzano l'utilizzo dell'approccio Fuzzy-FMEA nell'ingegneria d'affidabilità di sistemi meccanici.

### **4.1 Fuzzy-FMEA di una macchina LHD**

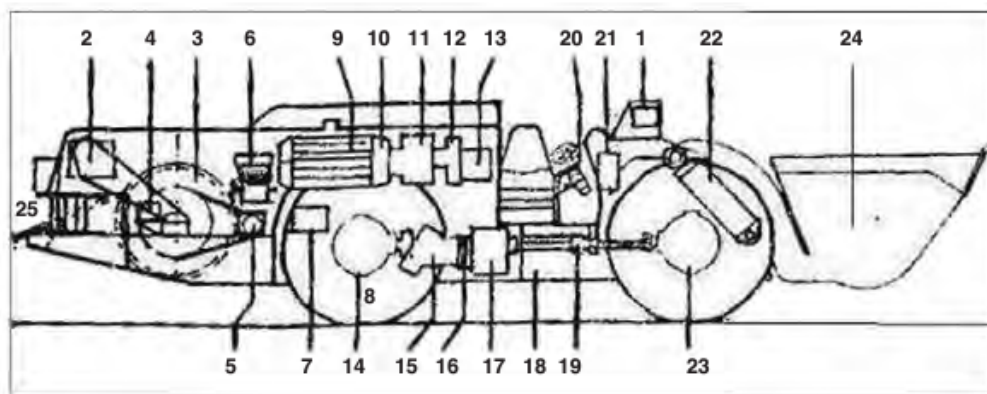
Nel mercato globale è sempre stato importante raggiungere un certo livello di produzione per garantire gli obiettivi di produttività previsti ed avere prezzi che fossero competitivi. I rapporti passati, mostrano come i risultati di produzione registrati nelle miniere sotterranee indiane nel corso degli anni, non siano stati soddisfacenti. Anche i risultati degli anni precedenti non sono rincuoranti. Questo può essere dovuto ad un utilizzo inaffidabile delle attrezzature per via di diverse ragioni come cattive pratiche gestionali, funzionamento e manutenzione impropri, mancanza di monitoraggio delle condizioni in tempo reale e ritardo nella risposta tempestiva all'identificazione dei problemi durante il funzionamento [12]. E' chiaro dunque, come un utilizzo affidabile dell'attrezzatura permetta di recuperare le perdite avute in termini di prestazioni, e garantire il livello di produttività previsto. Lo studio in questione è stato condotto in una

miniera di metalli sotterranea indiana situata nel nord-est del paese. L'attrezzatura oggetto dell'analisi è un macchinario LHD (*load, haul, dump*), utilizzato per il trasporto del materiale estratto (mediante perforazione e brillamento) dal punto di estrazione al punto del processo di frantumazione primaria. Viene svolta una FMEA per identificare le varie modalità di guasto che sono poi classificate tramite l'indice RPN per dare una priorità d'azione. L'approssimazione di quest'ultimi viene poi migliorata tramite i principi della logica fuzzy.

#### **4.1.1 LHD**

Il "Load Haul Dumper", è una macchina fondamentale per quanto riguarda la meccanizzazione nell'ambito minerario. Si tratta di un macchinario senza cingoli montato su quattro ruote. E' progettato per l'estrazione sotterranea dunque è compatto e di basso profilo. E' dotato di una benna frontale progettata per trasportare e scaricare materiale. Ha una capacità di 3 m cubi ed il suo funzionamento è bidirezionale. Viene alimentato da un motore sincrono. La trasmissione è idraulica e la macchina ha freni di stazionamento e un cambio a due stadi. L'operatore può controllarla localmente o da remoto attraverso un'apposita console. La macchina può operare in un raggio di 130 metri e dispone di un sistema per il recupero del carbone in zone sicure. E' fornito anche di un compressore per l'aria pneumatica e utilizza pneumatici radiali in acciaio. (Figura 4.1.1.1) [18] In questa indagine viene presa in considerazione la macchina *Sandvick LHD modello LH517*.





<b>Legend</b>		
1—Head light	9—Electric motor	18—Drive lines
2—Trunkanage	10—Coupling	19—Bearing block
3—Cable reel	11—Hydraulic pump	20—Orbital
4—Cable security system	12—Coupling	21—Control valve
5—Reel motor	13—Hydraulic pump	22—LIPT cylinder
6—Compressor	14—Rear axle	23—Front axle
7—Air tank	15—Hydraulic motor	24—Bucket
8—Rear wheel	16—Parking brake	25—Cable
	17—Gear box	

*Figura 4.1.1.1 schema di un macchinario LHD tratto da 18*

#### 4.1.2 FMEA

Per l'analisi sono stati considerati due anni di guasti. In base al tipo di guasto la macchina è stata suddivisa in 7 sottosistemi: sottosistema motore (SSE), sottosistema frenatura (SSBr), sottosistema pneumatico (SSTy), sottosistema idraulico (SSH), sottosistema elettrico (SSEI), sottosistema di trasmissione (SST) e sottosistema meccanico (SSM). Per ogni sottosistema sono state individuate le possibili modalità di guasto come mostrato in tabella (in totale sono 16). Sono fornite informazioni sulle ragioni del verificarsi delle modalità di guasto, l'influenza delle modalità di guasto sulle prestazioni della macchina e anche le pratiche gestionali o misure di controllo, raccomandate per la risoluzione dei problemi e garantire il livello di disponibilità e utilizzo richiesto. (Tabella 4.1.2.1)

Root cause analysis of the complex system considered.

Sub system	Potential Failure Mode	Reason for Potential Failure Mode	Effect of Potential Failure Mode	Recommended action
SSBr- SSTy	Brake pedal broken (F1) Tyre punctures (F2) Tyre burst (F3)	Wear and tear, lubrication and lack of daily inspection Poor underfoot conditions, overloading, improper inflation Incorrect fitment, excessive torque, concerning or rim spin, incorrect or defective rim conditions Metal particles trapped in spool	Prone to accidents The machine was stopped for repair The machine was stopped for repair	Brake system need to be cleaned every 1000 h Remove and send to re-buttoning agencies Remove the tyre and replace with a new one
SSH	Directional solenoid connector spool damage (F4) Cylinder bearing damaged (F5)	Wear and tear Piston rod eye broken and during lowering the boom, piston rod bent Lubrication, wear and tear	Flush entire hydraulic system post failure of any hydraulic component The hydraulic system will be damaged Poor operating condition and Deterioration Cylinder damage	Hydraulic oil needs to be cleaned & flushed every 1500 hrs Check for greasing and if require remove and replace with a new one Life of the piston rod is not tracked. Strengthen the design in a new type Training to be conducted for maintenance crew about Contamination Control Replace with a modified design bracket
SSE	Engine mounting bracket (Rear Supporting Blocks) broken (F8) Steering function not working (F9) Cable drum sprocket, chain fail (F10)	Continuous impact and stress concentrated on the weak portion of the supporting block Internal failure of the directional spool due to aging Lack of greasing, wear and tear	Misalignment with adjacent components led to breakage of torque converter regulator Machine directions are not possible to control The machine is not operable The engine dropped slightly from its mounting position	Replace steering main valve Greasing should be done on a daily basis Remove and replace with a new one Replace with a new regulating valve
SSTr	Cable reel fail (F11) Transmission oil leakage (F12)	Improper maintenance, aging factor Breakage of torque converter regulating valve	The machine is not operable	Operator refresher training to be conducted and greasing of the machine must be done every day Remove and replace with a strengthened one
SSM	Swing lever eye broken (F13) Boom broken (F14) Bucket broken (F15) Knuckle joint broken (F16)	The machine ran without greasing for the last 8 consecutive shifts and machine is regularly operated by operators Overloading, Lifting cylinder breakage and poor welding at the joints Poor welding at the joints Broken due to poor design, weak strength, and overload	Production stoppages Production stoppages Production stoppages	To be welded at the required sections Remove and replace with a strengthened one

Tabella 4.1.2.1 modulo FMEA tratto da [12]

Sono poi stati calcolati gli indici RPN dal prodotto dei tre parametri S,O,D. La stima di questi è stata fatta assegnando a ciascun parametro, per ogni tipo di guasto, un punteggio su una scala da 1 a 10, sulla base delle decisioni di esperti coinvolti nello studio. (Tabella 4.1.2.2)

Estimated values of risk indexed parameters and RPN metrics.

Sub system	Failure Type	Severity (S)	Occurrence (O)	Detection (D)	RPN
SSBr	F1	2	6	3	36
SSTy	F2	8	8	2	128
	F3	7	8	1	56
SSH	F4	2	9	2	36
	F5	3	8	6	144
	F6	2	8	6	96
	F7	2	4	6	48
SSE	F8	7	4	2	56
	F9	4	6	7	168
SSEI	F10	8	3	4	96
	F11	8	2	4	64
SSTr	F12	3	8	3	72
SSM	F13	5	4	1	20
	F14	9	3	2	54
	F15	9	4	2	72
	F16	8	3	2	48

Tabella 4.1.2.2 valutazione dei parametri di rischio e RPN per ogni modo di guasto tratta da [12]

### 4.1.3 Fuzzy-FMEA

Lo sviluppo del modello di valutazione *Fuzzy-FMEA* è stato effettuato utilizzando il software MATLAB 7.0. Le tre variabili input S, O, D sono state fuzzificate in termini linguistici come funzioni di appartenenza (5 livelli: *Hazardous/Very High (V.H)*, *High (H)*, *Moderate (M)*, *Low (L)*, and *None (N)* ) e aggiunte al modello tramite l'editor del sistema di interfaccia Fuzzy (FIS) di MATLAB. (Figura 4.1.3.1)

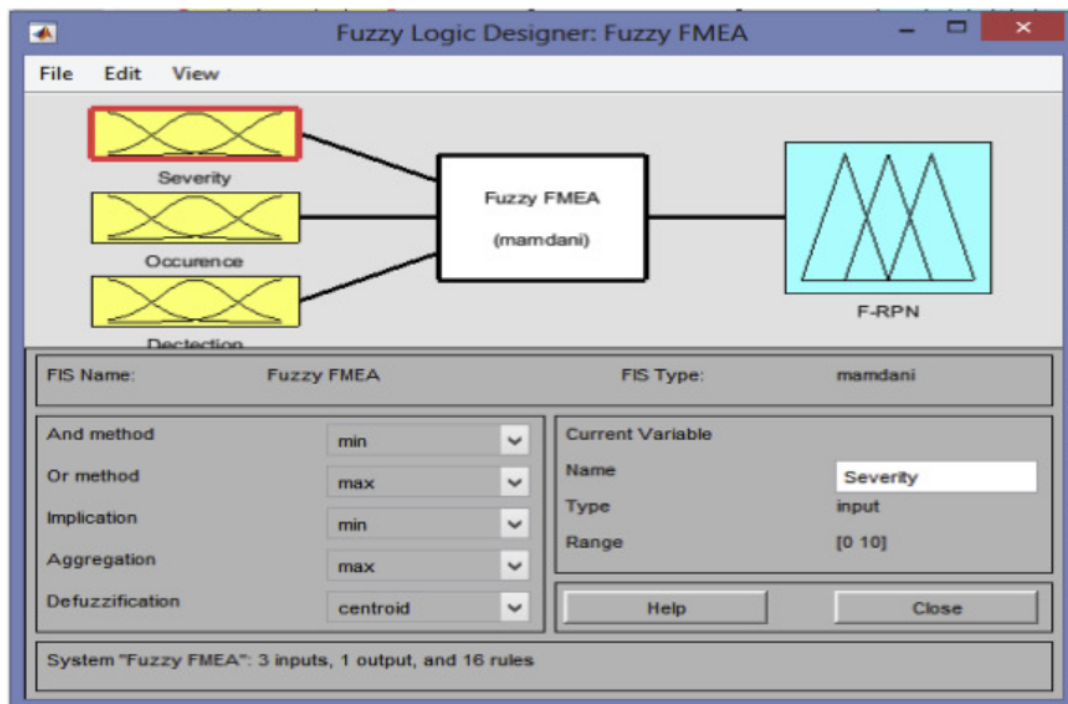


Figura 4.1.3.1 FIS editor, tratto da [12]

Le variabili input possono essere modificate accedendo al *Membership Function Editor* dall'editor del sistema. (Figura 4.1.3.2)

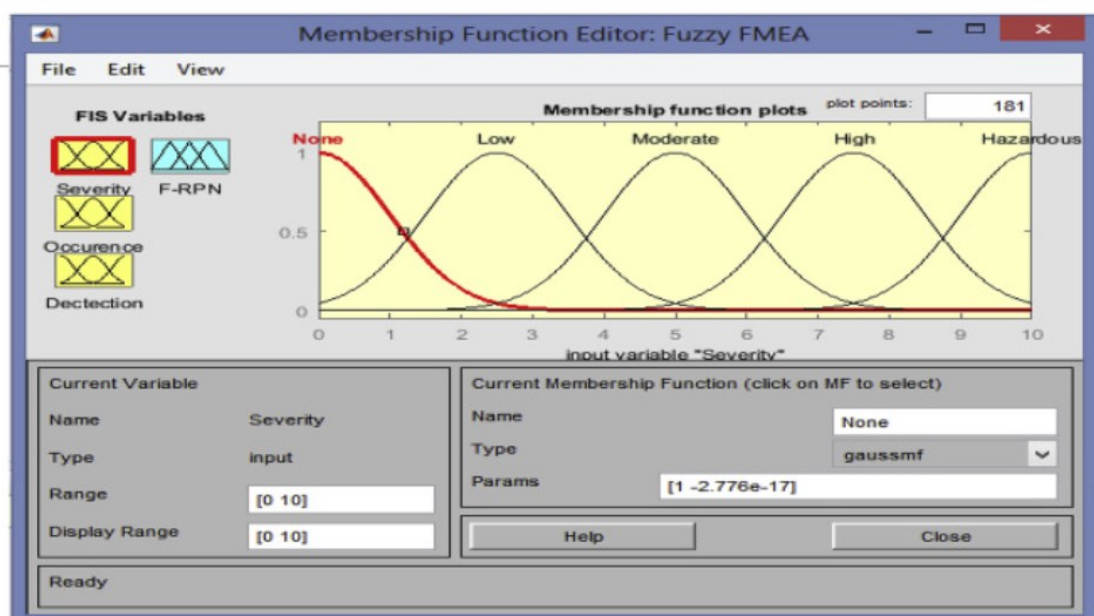


Figura 4.1.3.2 Membership Function Editor, tratta da [12]

Le variabili input fuzzificate sono state valutate usando le regole fuzzy If-Then. Si sono ottenute 125 combinazioni. Degli esempi sono:

- IF Severity is L and Occurrence is M and Detection is L THEN FRPN is L
- IF Severity is H and Occurrence is H and Detection is H THEN FRPN is H Critical
- IF Severity is H and Occurrence is H and Detection is V.H THEN FRPN is M

La formulazione della regola è stata fatta considerando il valore di gravità come input più decisivo per il valore del FPRN (valore di RPN fuzzificato) quindi se il valore di S è molto alto, anche il valore fuzzy di RPN è molto alto, indipendentemente dal valore degli altri due input. Tramite il motore di inferenza in MATLAB, si sono calcolati i valori fuzzy di RPN; essi sono stati classificati su nove intervalli: *Hazardous/Very High (V.H)*, *High (H)*, *Moderate (M)*, *Moderately Low (ML)*, *Moderately High (MH)*, *Low (L)*, *Very Low (V.L)*, *Remote (R)*, *Remotely High (RH)* e *Remotely Low (RL)*. Per tutta la durata della procedura è stato tenuto aperto il *Rule Viewer* di MATLAB (Figura 4.1.3.3) che permetteva l'accesso anche al *Rule Editor* (Figura 4.1.3.4). Il *Rule Viewer* viene generalmente utilizzato per mostrare l'immagine della risposta nel sistema di interfaccia *Fuzzy*. Viene anche usato per dimostrare come funziona la combinazione nelle regole e come la forma della singola funzione di appartenenza influenzi i risultati. Il *Rule Editor* permette invece di aggiungere le regole in forma linguistica.

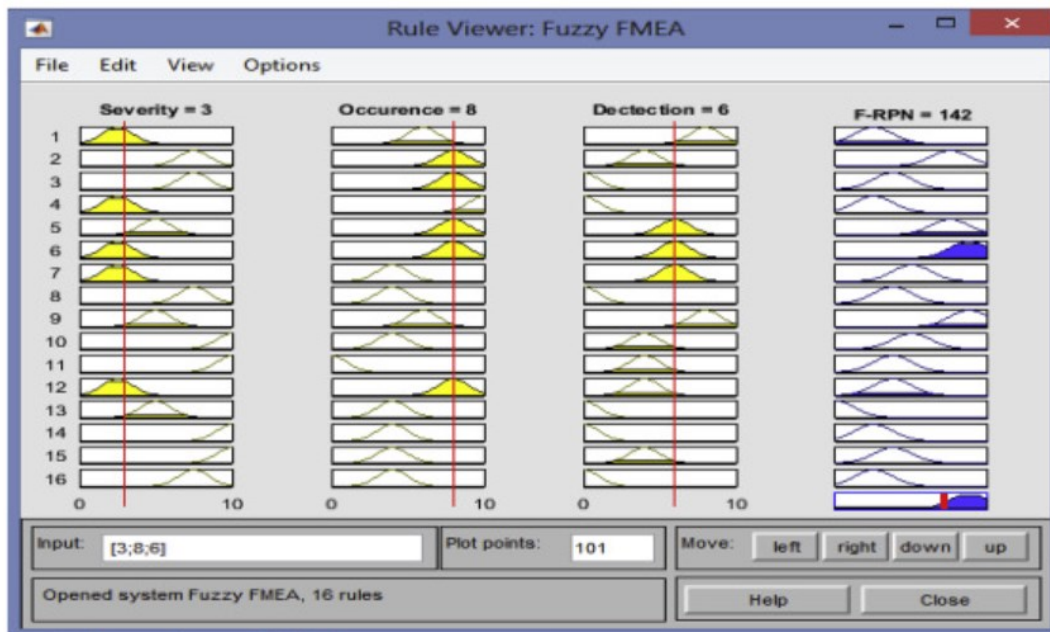


Figura 4.1.3.3 Rule Viewer; tratta da [12]

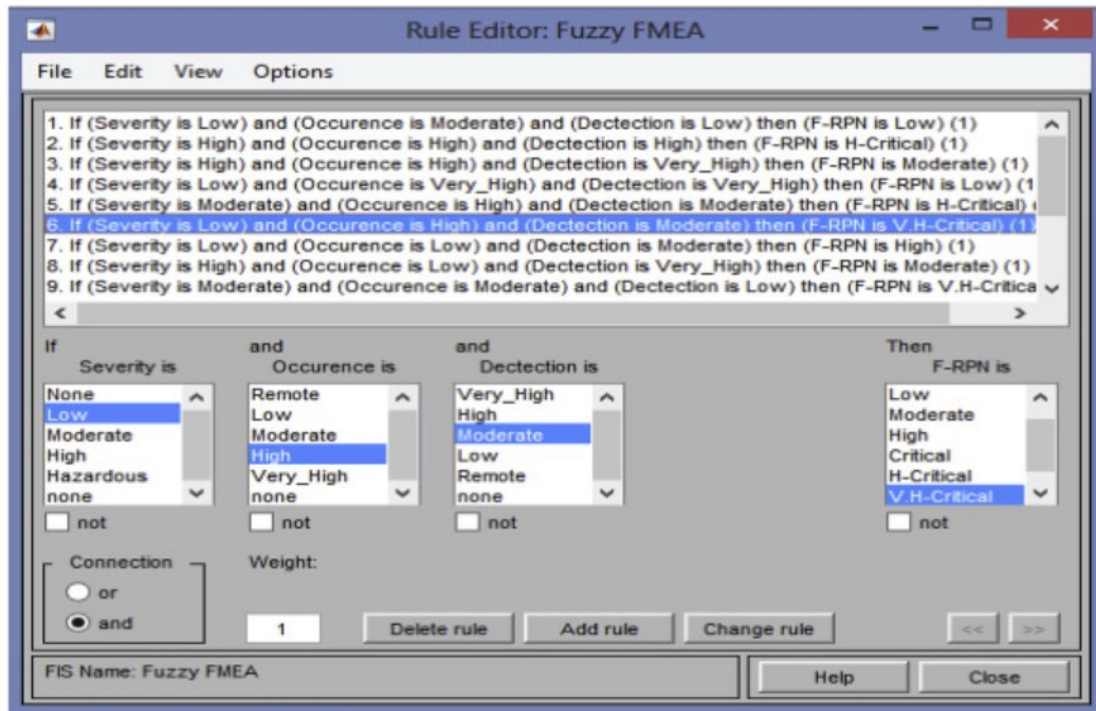
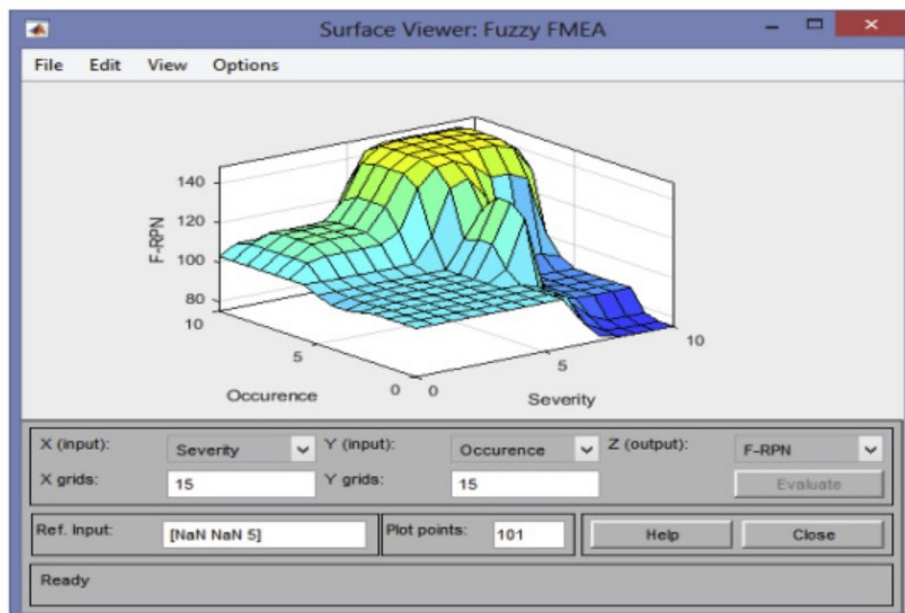


Figura 4.1.3.4 Rule Editor; tratta da [12]

Nell'analisi è stato anche utilizzato il *Surface Viewer* che permette di visualizzare la dipendenza dell'output da uno o due input. Qui si presenta una mappatura tridimensionale con input: S e D e output: FRPN. (Figura 4.1.3.5)



*Figura 4.1.3.4 Surface Viewer; tratta da [12]*

#### 4.1.4 Risultati

Nella tabella mostrata sottostante (Tabella 4.1.4.1) sono stati messi a confronto i risultati ottenuti dall'analisi della FMEA convenzionale e i risultati ottenuti dall'analisi FMEA basata sulla logica Fuzzy. Nel primo caso gli indici RPN sono stati calcolati dal prodotto dei tre termini S, O, D, mentre nel secondo caso i valori di RPN sono stati ottenuti direttamente tramite il sistema di interfaccia fuzzy su MATLAB.

**Comparison of conventional FMEA and Fuzzy FMEA RPN values.**

Sub system	Failure type	Conventional FMEA RPN	C-RPN ranking	Fuzzy FMEA RPN	F-RPN ranking
SSBr	F1	36	14	78.3	11
SSTy	F2	128	3	108	4
	F3	56	9	76.1	12
SSH	F4	36	15	67.6	15
	F5	144	2	142	1
	F6	96	4	142	2
	F7	48	12	93.7	5
SSE	F8	56	10	69.1	14
	F9	168	1	117	3
SSEI	F10	96	5	87.9	6
	F11	64	8	87.9	7
SSTr	F12	72	6	76.1	13
SSM	F13	20	16	32	16
	F14	54	11	80	8
	F15	72	7	80	9
	F16	48	13	80	10

*Tabella 4.1.4.1 comparazione dei risultati, tratta da [12]*

#### 4.1.5 Conclusioni

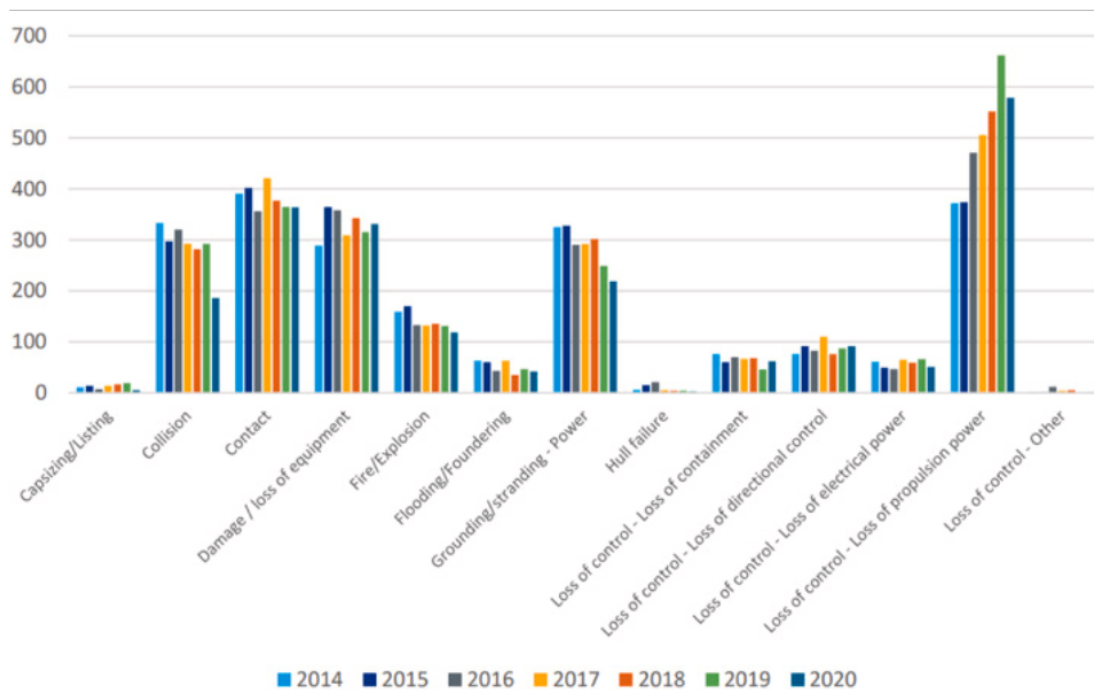
Dalla FMEA convenzionale si sono ottenuti valori alti di RPN per, in ordine dal più alto al più piccolo, F9 del sottosistema SSE, F5 del sottosistema SSH e F2 del sottosistema SSTy. Il valore di RPN stabilisce quali modalità di guasto hanno priorità (tra le altre) nel trattamento. Più è alto il valore di RPN, più è elevato l'effetto del modo di guasto. Individuati i guasti prioritari, occorre prestare attenzione agendo nel caso secondo le

azioni previste di riparazione o sostituzione, associando una politica di manutenzione preventiva e fornendo formazione e consapevolezza su ogni componente al personale di manutenzione e operativo. In alcuni casi la sostituzione non è possibile; si parla di guasti censurati e questi componenti andranno sostituiti durante la manutenzione correttiva [12]. L'utilizzo della Fuzzy-FMEA, sviluppato utilizzando MATLAB, pur tenendo conto dei miglioramenti visti (come valutare due modi di guasto con RPN identico) ha fornito valori di RPN simili per i modi di guasto F9, F5, F11, F13 e F14 [12]. Tuttavia ciò che però è fondamentale sottolineare, è il principio che sta alla base della tecnica per capire il valore e l'importanza di quest'ultima. Tale approccio infatti valuta in modo appropriato e logico, parametri che sono vaghi e ambigui, dando maggior significato e coerenza ai valori di RPN.

## **4.2 Fuzzy-FMEA di un compressore a bordo di una nave**

La sicurezza in mare è una delle preoccupazioni più critiche nel campo marittimo, poiché ha effetti devastanti sulla proprietà, sull'ambiente e sulla vita di un essere umano [16]. Dalla distribuzione delle cause di incidenti navali che vi sono stati tra il 2014 e il 2020, emerge come la perdita di controllo – perdita di propulsione sia quella più frequente. (Figura 4.2.1)





**Figura 4.2.1** distribuzione delle cause di incidenti navali, tratta da [16]

Quando una nave perde il controllo possono verificarsi eventi catastrofici come incagliamento, contatto, collisione e incendio. L'incapacità di controllare una nave, dipende direttamente dal motore principale e dai macchinari ausiliari. Le sale dei motori di una nave sono strutture molto complesse, dove un numero grande di apparecchiature sono tra loro interconnesse. Tra queste va menzionato il sistema ad aria compressa, che alimenta il motore principale della nave e l'avviamento e le operazioni di routine dei motori a diesel. Sono i compressori che consentono la produzione di quest'aria, e sono di fondamentale importanza per la vita di una nave. E' stata dunque effettuata un'analisi d'affidabilità sul compressore, utilizzando la FMEA (poi revisionata tramite l'approccio *fuzzy*), affidando lo studio a 6 esperti, capo ingegneri, con una laurea in navigazione oceanica con almeno 5 anni di esperienza a bordo di una nave.

#### **4.2.1 Sistema ad aria compressa di una nave**

Un sistema ad aria compressa è costituito da compressori d'aria principali, serbatoi d'aria, valvole di regolazione della pressione, compressori di emergenza e tubazioni. (Figura 4.2.1.1) L'aria compressa prodotta nei compressori è raffreddata dal sistema di raffreddamento ad acqua dolce a bassa temperatura e viene poi immagazzinata nei

serbatoi d'aria principale, in attesa di raggiungere i meccanismi di avviamento del motore principale della nave e di quelli diesel, ad una pressione di circa 30 bar. In figura è possibile visionare il sistema di aria compressa di una nave cisterna con un motore principale a 2 tempi e 3 generatori diesel a 4 tempi. Oltre all'avviamento del motore principale e quelli a diesel, il sistema ad aria compressa è importante per l'azionamento ed il controllo di una varietà di sistemi di bordo.

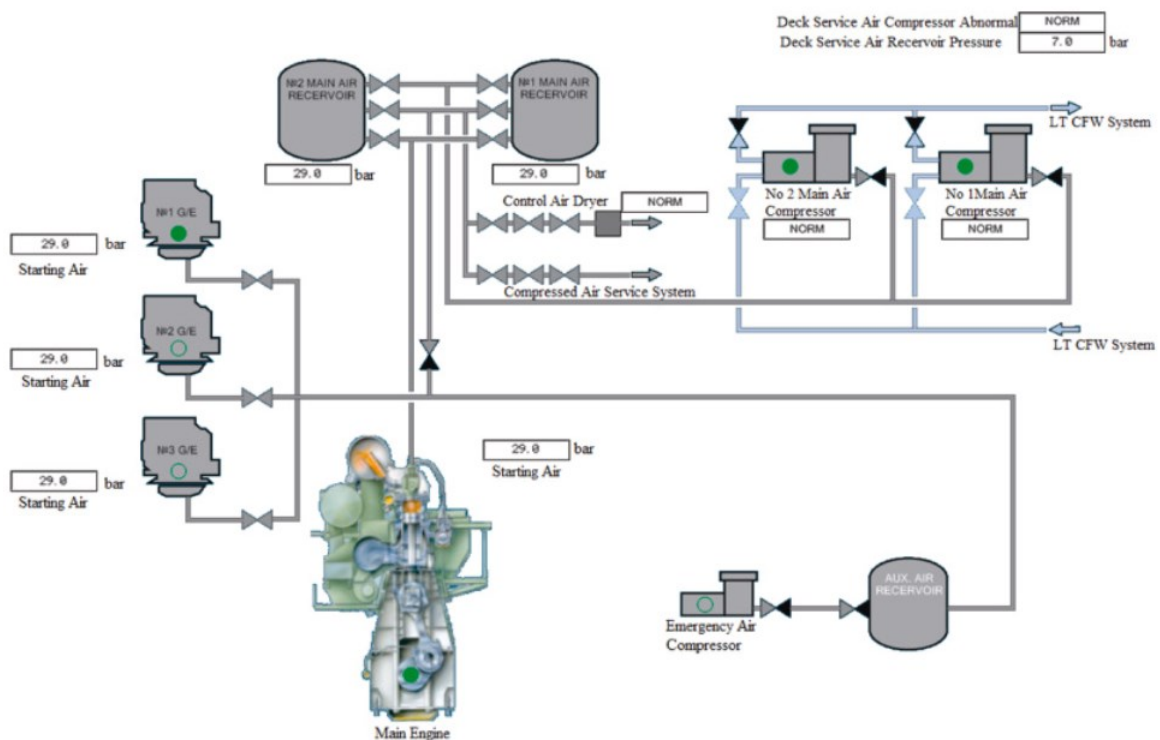
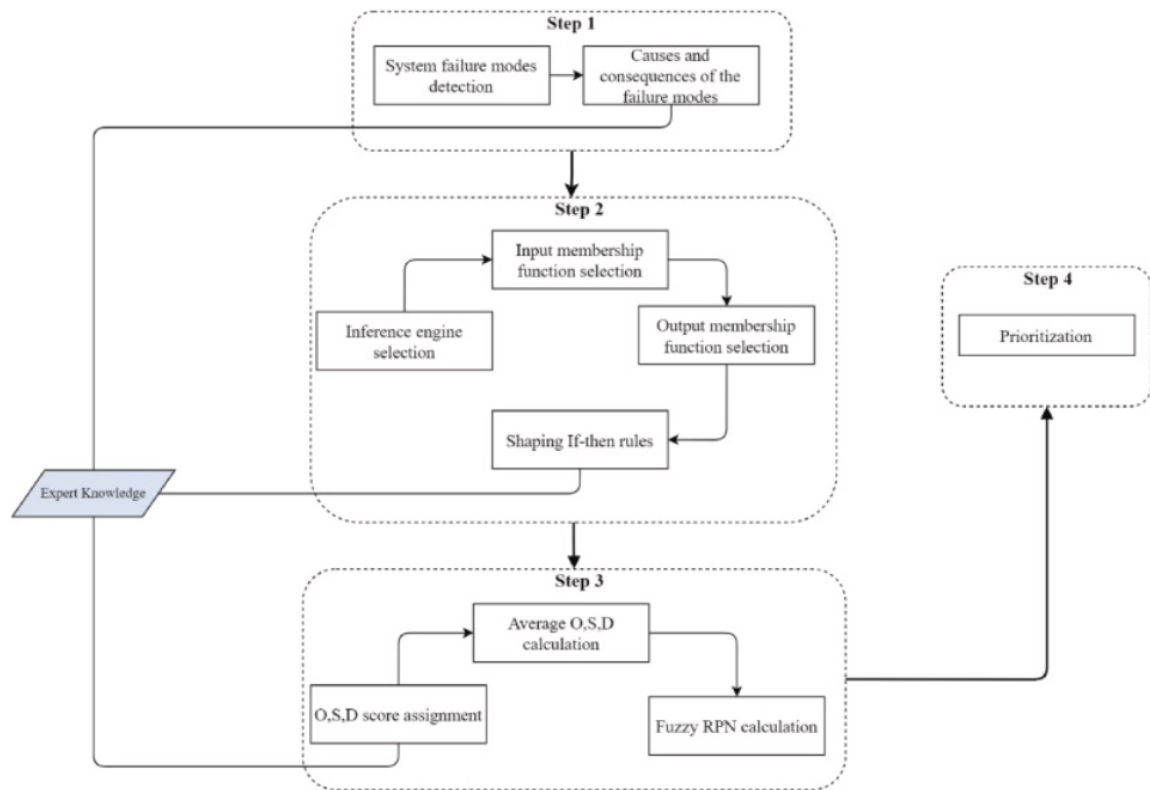


Figura 4.2.1.1 schema di un sistema ad aria compressa, tratta da [16]

## 4.2.2 Metodo di Analisi e risultati

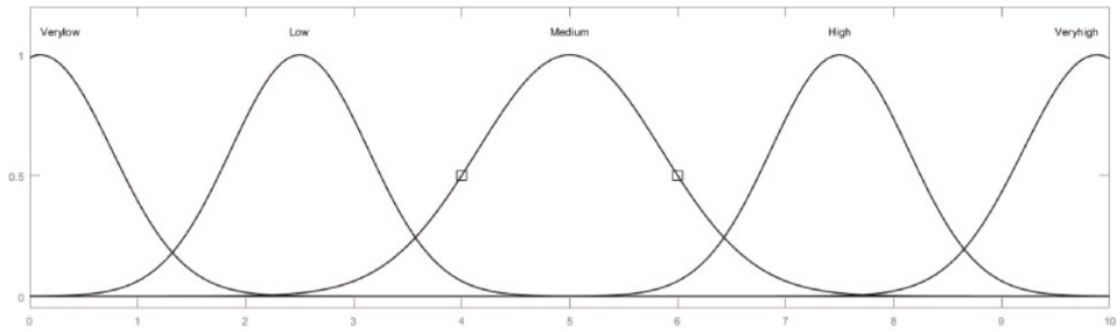
Il compressore è il cuore del sistema ad aria compressa e un suo guasto porterebbe inevitabilmente al guasto dell'intero sistema e dunque alle problematiche viste prima. E' stato applicato uno studio strutturato in 4 passi come mostrato in figura. (Figura 4.2.2.1) Sul compressore è stata svolta una FMEA, perciò da procedura il sistema è stato suddiviso in sottosistemi e per ogni componente sono state identificate le relative modalità di guasto. Sono state individuate 33 modalità di guasto. Utilizzando il giudizio

degli esperti, si sono stimati per ogni modalità di guasto di ciascun componente, i fattori che contribuiscono al guasto e le conseguenze del guasto.

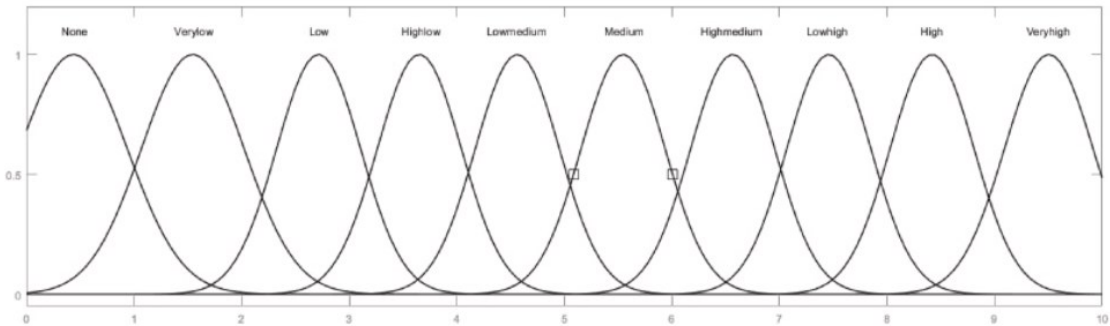


**Figura 4.2.2.1** struttura del metodo di studio, tratta da [16]

Come secondo passo si è sviluppato il modello a logica fuzzy: sono state usate funzioni di appartenenza gaussiane a 5 livelli per la fuzzificazione delle variabili input S, O, D e una funzione di appartenenza gaussiana a 10 livelli per l'output FRPN. (Figure 4.2.2.2-3) Una base di regole è importante per permettere al motore di inferenza fuzzy di operare e fornire l'output, date le variabili input. Gli esperti hanno utilizzato la regola *If-Then* e utilizzando tutte le combinazioni possibili, moltiplicando i livelli delle funzioni di appartenenza in input, hanno stabilito 125 regole.



**Figura 4.2.2.2** funzione di appartenenza gaussiana a 5 livelli, tratta da [16]



**Figura 4.2.2.3** funzione di appartenenza gaussiana a 10 livelli, tratta da [16]

Al terzo punto, sempre per mezzo della conoscenza e del giudizio degli esperti, è stata fatta una stima degli indici S,O, D per ogni modalità di guasto. Come da normativa, è stato assegnato un punteggio da 1 a 10, per ogni parametro. Si è fatta poi una media dei risultati. (Tabella 4.2.2.1) Per il calcolo dell'output è stato utilizzato il *Fuzzy Inference System* del *fuzzy logic designer tool* di MATLAB R2020b.

Average O-S-D, RPN, and Fuzzy RPN calculations of the failure modes.

Code	Average			RPN	Fuzzy RPN
	O	S	D		
FM01	3.17	3.67	1.33	15.48	2.80
FM02	5.00	7.50	2.33	87.50	5.52
FM03	3.33	8.00	2.83	75.56	4.89
FM04	4.00	6.67	5.50	146.67	5.43
FM05	4.33	3.50	3.50	53.08	4.44
FM06	4.00	2.83	2.67	30.22	3.68
FM07	4.33	4.33	5.33	100.15	5.48
FM08	3.33	6.17	7.83	161.02	6.29
FM09	7.00	5.33	5.33	199.11	5.56
FM10	5.00	7.33	5.17	189.44	5.55
FM11	3.50	8.00	4.50	126.00	5.59
FM12	4.67	6.00	4.50	126.00	5.52
FM13	4.67	5.50	4.83	124.06	5.54
FM14	3.00	7.67	4.50	103.50	5.52
FM15	3.33	7.33	3.00	73.33	4.76
FM16	3.00	7.67	3.33	76.67	4.83
FM17	4.50	7.00	4.67	147.00	5.52
FM18	4.00	8.33	6.67	222.22	6.43
FM19	4.50	5.50	3.33	82.50	4.81
FM20	3.17	4.17	1.50	19.79	3.45
FM21	6.83	5.00	3.50	119.58	5.29
FM22	4.83	4.50	4.17	90.63	5.46
FM23	5.33	4.67	4.00	99.56	5.41
FM24	4.33	5.50	3.33	79.44	4.79
FM25	6.33	5.33	2.50	84.44	4.95
FM26	5.17	5.83	3.67	110.51	5.17
FM27	4.83	5.67	3.83	104.99	5.31
FM28	6.17	4.83	5.33	158.96	5.55
FM29	2.33	8.33	4.00	77.78	5.41
FM30	2.50	7.33	3.00	55.00	4.63
FM31	3.17	7.50	3.50	83.13	4.95
FM32	4.67	7.33	3.33	114.07	5.48
FM33	3.50	6.33	5.00	110.83	4.98

*Tabella 4.2.2.1 stima dei vari parametri (media delle variabili input, RPN, FRPN), tratta da [16]*

Attraverso la defuzzificazione si sono ottenuti gli indici RPN su scala numerica per poi stilare una classifica delle modalità di guasto. (Tabella 4.2.2.2)

**Prioritization of the compressor system failure modes.**

Failure Mode	Fuzzy RPN Prioritization	Failure Mode	Fuzzy RPN Prioritization
FM18	1	FM27	12
FM08	2	FM21	13
FM11	3	FM26	14
FM09	4	FM33	15
FM10	5	FM25	16
FM28	5	FM31	16
FM13	6	FM03	17
FM02	7	FM16	18
FM12	7	FM19	19
FM14	7	FM24	20
FM17	7	FM15	21
FM07	8	FM30	22
FM32	8	FM05	23
FM22	9	FM06	24
FM04	10	FM20	25
FM23	11	FM01	26
FM29	11		

*Tabella 4.2.2.2 classifica dei modi di guasto dato il valore di RPN da logica fuzzy, tratta da [16]*

### 4.2.3 Conclusioni

I cinque modi di guasto più critici, considerando i risultati dell'analisi fuzzy RPN, sono FM18 (6,43), FM08 (6,29), FM11 (5,59), FM09 (5,56), FM10 e FM28 (5,55). La rottura degli anelli del pistone (FM18) è stata identificata come la situazione più rischiosa nel sistema del compressore della nave. Scendendo come importanza, si trova l'usura del rivestimento del pistone (FM08). Il punteggio RPN elevato, è principalmente dovuto ai parametri S e D considerati dagli esperti come più importanti tra i parametri di input, per una valutazione più coerente e precisa in relazione al contesto analizzato. La rilevazione di un difetto sugli anelli del pistone richiede un'osservazione avanzata, perciò il fattore di controllo gioca un ruolo importante in questi modi di guasto. Il funzionamento rumoroso del compressore (FM11) ha un punteggio medio di gravità elevato poiché colpisce tutte le parti del compressore. Vi sono poi il compressore in funzione continua (FM09), il surriscaldamento delle parti del compressore (FM10) e i depositi di carbonio sulle valvole (FM28). Delle problematiche nei compressori nel sistema ad aria compressa, possono causare delle catastrofi in poco tempo. Quest'analisi dei rischi del sistema, permette di informare stakeholder marittimi come specialisti della sicurezza, equipaggio della nave, compagnie di navigazione, autorità portuali, ispettori,

ecc, nella speranza che vengano adottate misure preventive in particolare per navi che navigano in condizione critiche (come gli stretti), ed evitare incidenti gravi [16].

### **4.3 Fuzzy-FMEA delle operazioni fisiche di un impianto di trattamento delle acque reflue**

Le centrali di trattamento delle acque reflue sono una delle infrastrutture urbane più importanti in quanto riciclano acqua e nutrienti dalle acque reflue raccolte dalle unità residenziali, commerciali e industriali [19]. I guasti strutturali in queste centrali possono avere gravi conseguenze, tra cui lo scarico di effluenti non trattati contenenti contaminanti chimici e biologici nell'ambiente, con il potenziale rischio di diffusione di malattie infettive. Ad esempio, l'uso di acque reflue parzialmente trattate o non trattate in agricoltura è identificato come un problema critico, poiché può portare all'accumulo di sostanze tossiche, inclusi metalli pesanti, nel suolo o nei raccolti, con conseguenze per la salute umana e l'ambiente. Detto questo, si sottolinea l'importanza dell'identificazione dei guasti e della valutazione dei rischi nelle centrali di trattamento delle acque reflue, al fine di garantire un'adeguata rimozione dei contaminanti e l'implementazione di programmi di gestione del rischio [19].

#### **4.3.1 Contesto**

E' stato condotto uno studio di valutazione dei rischi associato ai processi fisici della centrale di trattamento delle acque reflue del comune di Sahand, nuova città a circa 20 km da Tabriz nella parte nord-est dell'Iran. La centrale è stata costruita su una superficie di terra di circa 7 ettari, ad un'altitudine media di 1400 metri. (Figura 4.3.1.1) La ricerca ha visto l'impegno di un team di 5 esperti (il direttore della centrale di trattamento, un esperto di laboratorio e processo, un ingegnere operativo, un riparatore e un operatore di sistema) che ha applicato prima un modulo FMEA convenzionale e poi lo ha implementato con regole *fuzzy*, al fine di identificare e prioritizzare i rischi delle operazioni unitarie di screening e rimozione di sabbia della centrale.

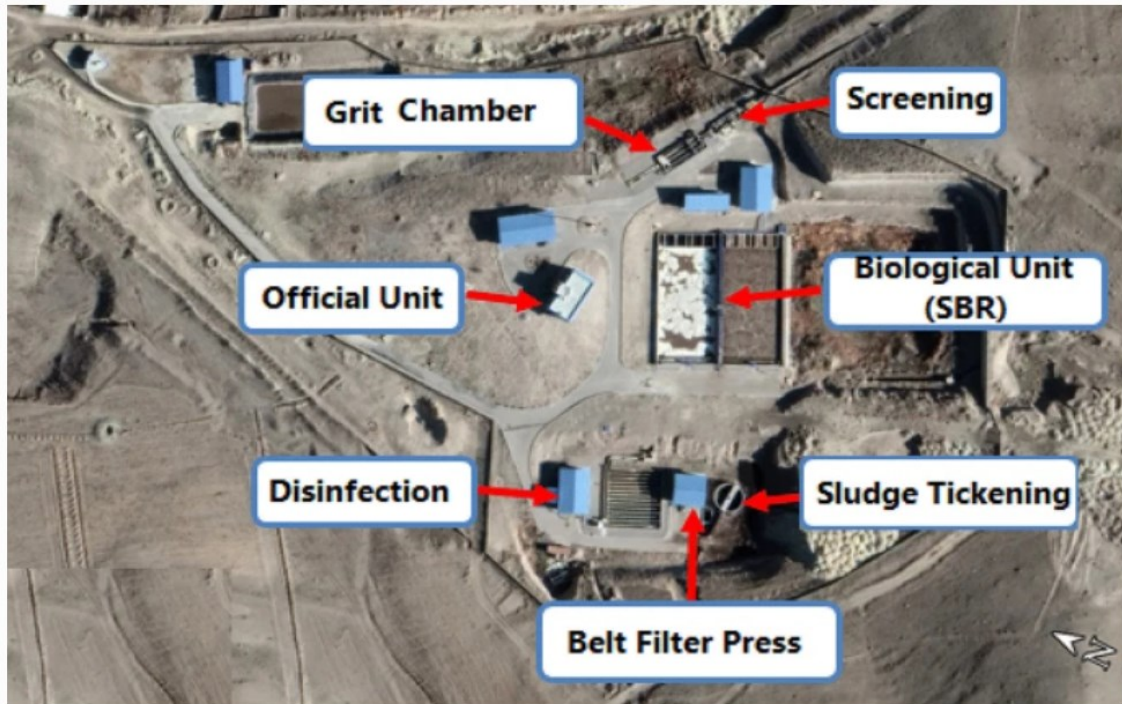


Figura 4.3.1.1 mappa schematica della centrale di Sahand, tratta da [19]

### 4.3.2 Metodo di Analisi

Lo studio è stato condotto secondo diversi step come mostrato in figura. (Figura 4.3.2.1) I dati di questo studio, ossia l'elenco di apparecchiature e parti e potenziali stati di guasto sono stati raccolti sul campo, attraverso interviste con ingegneri esperti del sistema. Indagando i rischi legati alla salute, alla sicurezza e all'ambiente, i membri del team hanno identificato 53 modi di guasto (26 guasti per lo screening e 27 guasti per l'unità di rimozione della sabbia). A questo punto sono stati compilati i moduli tradizionali FMEA. Ciascun guasto è registrato con le relative cause e effetti e i controlli esistenti. Successivamente si è calcolato il *risk priority number*, una volta stimati per ogni guasto i parametri: *severity*, *occurrence* e *detectability*. (Tabelle 4.3.2.1-3) Si è poi passati alla formazione di un modello *Fuzzy-FMEA* (con le fasi già viste), servendosi del software MATLAB, utilizzando il *toolbox fuzzy*. Le variabili linguistiche e le funzioni di appartenenza, così come le regole "If-Then", sono state definite con l'opinione degli esperti e dei membri del team incaricato. I valori di RPN ottenuti dalla defuzzificazione, sono stati classificati secondo il parere degli esperti come mostrato in tabella (Tabella 4.3.2.2)



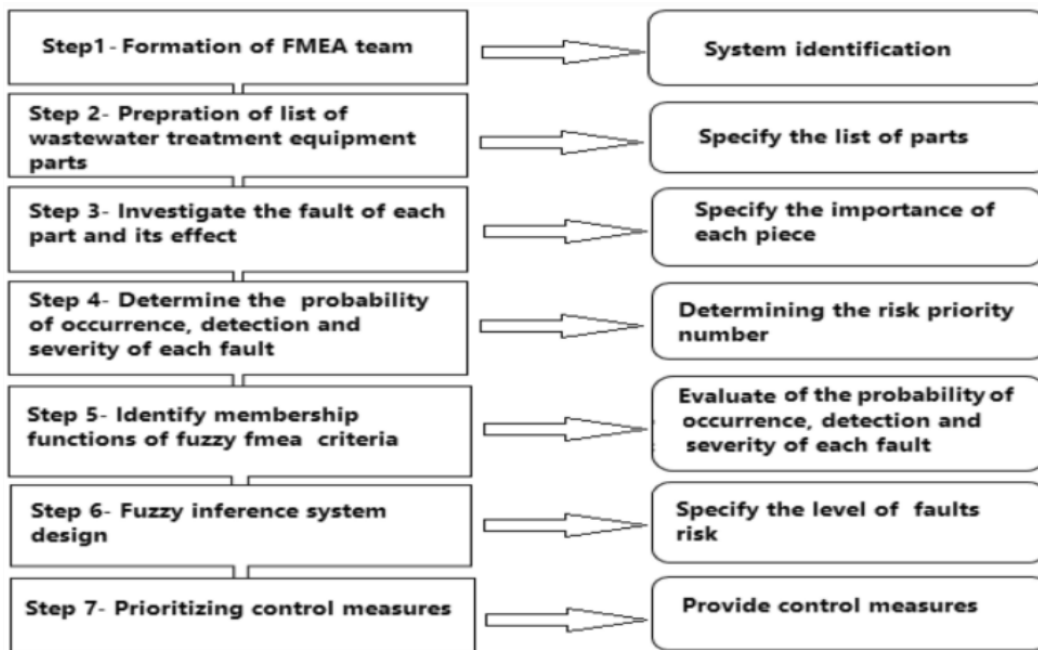


Figura 4.3.2.1 struttura del metodo di studio utilizzato, tratta da [19]

Rank	Outcome severity (S)	Probability of occurrence (O)	Detection (D)
10	Dangerous—without warning	Extremely high ( $\geq 1$ in 2)	Absolutely nothing
9	Dangerous—without warning	Very high (1 in 3)	Very insignificant
8	Severe	High (1 in 8)	Insignificant
7	High	High (1 in 20)	Very low
6	Considerable	Medium (1 in 80)	Low
5	Medium	Medium (1 in 400)	Medium
4	Low	Medium (1 in 2000)	Relatively high
3	Insignificant	Low (1 in 15,000)	High
2	Very insignificant	Low (1 in 1,500,000)	Very high
1	Nothing	Unlikely (1 in 15,000,000)	Almost certain

Tabella 4.3.2.1 tabella di riferimento per la stima di S, O, D, tratta da [19]

RPN	Risk level
1–300	Low
301–600	Medium
601–1000	High

Tabella 4.3.2.2 classifica dei valori di RPN secondo le opinioni degli esperti, tratta da [19]

Unit	Fault mode	Fault cause	Fault effect	Severity	Probability	Detection	RPN	Existing controls	Recommended controls
<b>Screening</b>	Screen clogging	Lack of regular cleaning	Damage to subsequent equipment	10	9	6	540	-	Daily inspection and monitoring of the operator's work
	Screen fracture	Over function	Damage to subsequent equipment	10	2	2	40	-	Inspection and monitoring
	Screen carries	Over function	Damage to subsequent equipment	10	3	3	90	-	Inspection and monitoring
	Lack of manhole shielding	Lack of safeguarding during construction	The operator falling into sewage	10	1	3	30	-	Safeguarding
<b>Grit removal</b>	Alternator burn	Over function—power fluctuations	Failure to bridges movement and lack of grains collection	8	3	2	48	Visual inspection and replacement of alternator after failure	Inspection and monitoring
	Chain dislocation	Poor performance and high pressure on the paddles	Failure to bridges movement and lack of grits collection	8	6	3	144	-	Regular inspection and monitoring
	Towing wires cutting	Over function	Failure to rotational movement of the paddles	7	6	4	168	-	Regular and periodic checking
	Corrosion of tires	Over function	Lack of smooth movement of the bridge	4	3	2	24	-	Inspection and timely replacement
	Fracture of the paddle	Over function	Lack of grits collection	7	6	7	294	-	inspection and replacing the broken paddle

*Tabella 4.3.2.3 modulo FMEA dei principali modi di guasto identificati, tratta da [19]*

### 4.3.3 Risultati

Per quanto riguarda i risultati della valutazione del rischio delle unità di screening (meccaniche e manuali), la classifica dei modi di guasto in base alla FMEA tradizionale e Fuzzy è così presentata nella Tabella 4.3.3.1. Entrambe i metodi hanno individuato come guasto primo e ultimo rispettivamente la modalità di guasto dello schermo manuale intasato (S1) e la modalità di guasto del taglio del convogliatore dello schermo meccanico (S26). Tuttavia, mettendo a confronto i risultati (si veda per questo la Figura 4.3.3.1), è possibile notare come: In base alla FMEA tradizionale, su 26 modalità di guasto identificate nelle unità di screening, 24 modalità di guasto (S2, S3 e S5-S26, con valori di RPN compresi tra 12 e 252) erano a basso rischio e 2 modalità di guasto, lo schermo manuale intasato (S1, RPN = 540) e il tubo del classificatore intasato (S4, RPN = 360), erano a medio rischio. Secondo questo metodo, nessuna delle 26 modalità di guasto rilevate nell'unità di screening era a alto rischio. Mentre secondo la *Fuzzy-FMEA*, su 26 modalità di guasto rilevate nelle unità di screening, 3 modalità di guasto, l'abrasione della spazzola dello schermo meccanico (S24, RPN = 124), il guasto della spazzola dello schermo meccanico (S25, RPN = 124) e il taglio del convogliatore dello schermo meccanico (S26, RPN = 124), erano a basso rischio e 19 modalità di guasto (S5-S23, RPN = 500) erano a medio rischio. Inoltre, 4 modalità di guasto, l'intasamento dello schermo manuale (S1, RPN = 894), il guasto della spazzola dello schermo manuale (S2, RPN = 875), il guasto della spazzola dello schermo manuale (S3, RPN = 875) e il guasto del misuratore di livello (S4, RPN = 875), erano a alto rischio.

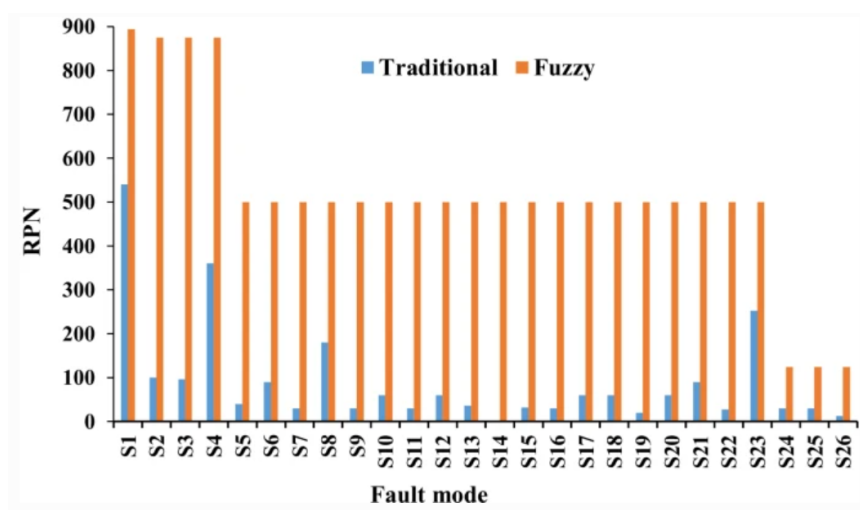
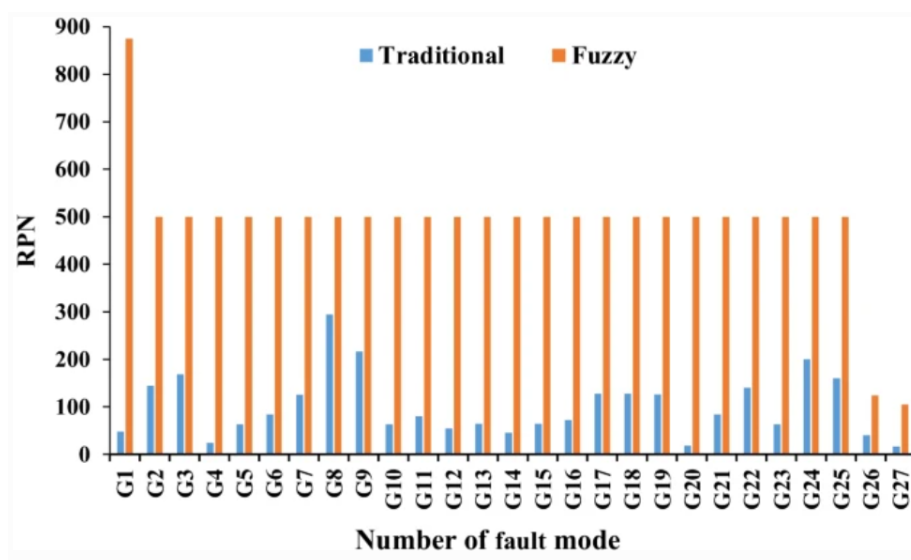


Figura 4.3.3.1 comparazione dei risultati di RPN, tratta da [19]

Traditional FMEA				Fuzzy FMEA			
Fault mode	RPN	Risk level	Prioritization	Fault mode	RPN	Risk level	Prioritization
S1	540	Medium	1	S1	894	High	1
S4	360	Medium	2	S2	875	High	2
S23	252	Low	3	S3	875	High	3
S8	180	Low	4	S4	875	High	4
S2	100	Low	5	S5	500	Medium	5
S3	96	Low	6	S6	500	Medium	6
S6	90	Low	7	S7	500	Medium	7
S21	90	Low	8	S8	500	Medium	8
S10	60	Low	9	S9	500	Medium	9
S12	60	Low	10	S10	500	Medium	10
S17	60	Low	11	S11	500	Medium	11
S18	60	Low	12	S12	500	Medium	12
S20	60	Low	13	S13	500	Medium	13
S5	40	Low	14	S14	500	Medium	14
S13	36	Low	15	S15	500	Medium	15

**Tabella 4.3.3.1** classifica dei modi di guasto (incompleta), tratta da [19]

Per quanto riguarda la valutazione dei modi di guasto per le unità di rimozione della sabbia si ha individuato la presenza di 27 modalità di guasto. Secondo il tradizionale FMEA, il livello più alto di rischio era correlato alla modalità di guasto della rottura della pala del ponte mobile (G8, RPN = 294), mentre secondo il FMEA fuzzy, il livello più alto di rischio era correlato alla modalità di guasto della combustione dell'alternatore del ponte mobile (G1, RPN = 875). Secondo il tradizionale FMEA, su 27 modalità di guasto identificate nell'unità di rimozione della sabbia, il 100% delle modalità di guasto (G1-G27, con valori di RPN compresi tra 16 e 294) era a basso rischio. Secondo questo approccio, nessuna delle 27 modalità di guasto identificate nell'unità di rimozione della sabbia era a medio o alto rischio. D'altra parte, in base al FMEA fuzzy, su 27 modalità di guasto identificate nell'unità di rimozione della sabbia, 2 modalità di guasto, la rottura delle pale della pompa (G26, RPN = 124) e la rottura delle tubazioni delle pompe (G27, RPN = 105), erano a basso rischio, 24 modalità di guasto (G2-G25, RPN = 500) erano a medio rischio e 1 modalità di guasto, la combustione dell'alternatore del ponte mobile (G1, RPN = 875), era ad alto rischio. (Figura 4.3.3.2)



**Figura 4.3.3.2** comparazione dei risultati di RPN, tratta da [19]

La Figura 4.3.3.3 mette a confronto i risultati ottenuti tramite l'approccio Fuzzy per le unità di screening e di rimozione della sabbia.

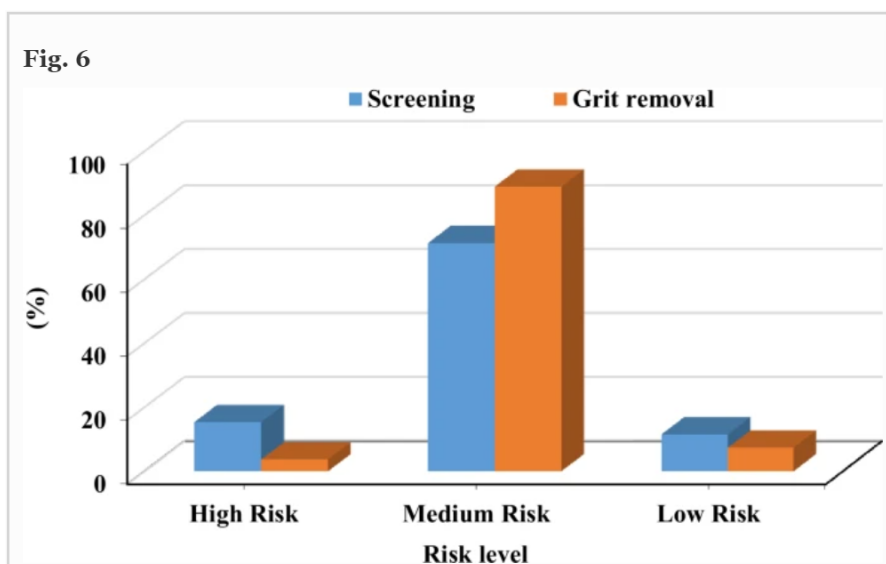


Figura 4.3.3.3 distribuzione F-RPN tratta da [19]

#### 4.3.4 Conclusioni

In generale, i risultati di questo studio, hanno mostrato che gli output dell'FMEA fuzzy sono molto diversi dagli output dell'FMEA tradizionale. Il motivo risiede principalmente nell'aver dato maggior importanza alla gravità delle conseguenze rispetto agli altri due parametri. Tale decisione è stata frutto dello studio degli esperti che ha pensato, con variabili e criteri definiti, di valutare i guasti in questo modo per ottenere una valutazione dei rischi più accurata e realistica in relazione al contesto analizzato (quella ottenuta mediante *Fuzzy-FMEA*). Sulla base dei risultati ottenuti le misure correttive più importanti che sono state raccomandate per una maggior prestazione dell'impianto sono: ispezione giornaliera o regolare, monitoraggio del

lavoro degli operatori, manutenzione regolare e periodica, riparazione o sostituzione tempestiva delle parti necessarie [19].

## ❖ Conclusione

Durante la trattazione dell'argomento, si è potuto appurare come l'affidabilità sia ormai una disciplina forte e consolidata, sia nel contenuto teorico (vedi le normative) che nelle applicazioni pratiche in ambito ingegneristico (vedi il metodo d'analisi studiato e i relativi casi studio). E' il risultato di una continua ricerca per far fronte all'incertezza realizzativa di prodotti, processi e servizi sempre più complessi. La volontà poi è anche quella di produrre efficienza accontentando la richiesta del consumatore di prodotti sempre più prestanti nel tempo. I costi dei guasti sono un altro problema e l'affidabilità aiuta. L'aver presentato qui il metodo d'analisi dell'affidabilità *Failure Modes and Effect Analysis (FMEA)* tra i tanti proposti dalle normative non è puro caso. Questo metodo in particolare è molto semplice e di facile applicazione. La procedura è lineare, chiara e intuitiva. E' per questi motivi che risulta essere uno dei metodi d'analisi più comunemente utilizzato nell'ambito dell'affidabilità in molti settori, su tutti quello ingegneristico e quello informatico. Tuttavia per quanto sia impiegato, questo metodo ha dei limiti che lo rendono relativamente difettoso o al massimo non completamente soddisfacente. A causa di questi svantaggi alcune volte non è adeguato rispetto al contesto analizzato. Nonostante ciò grazie alla ricerca, allo studio accademico ma non solo, grazie anche all'esperienza sul campo, è a nostra disposizione oggi, una soluzione più logica e coerente che permette di modellare il metodo FMEA tradizionale di partenza, in relazione all'ambito di studio affrontato. Il merito più grande di questa soluzione, la logica *fuzzy*, è il saper trattare in modo rigoroso e accurato l'incertezza che tanto attanaglia i progettisti e dunque ben si sposa con gli obiettivi dell'affidabilità. Tutto ciò per dire che l'affidabilità è tutto fuorché semplice e intuitiva come può sembrare. E' una materia che si è affermata, ricca di contenuto, ma che ancora non è perfetta e forse non lo sarà mai, perché per sua natura è intrinsecamente correlata al progresso, allo sviluppo e quindi al fronteggiare nuove problematiche che la metteranno in difficoltà. L'affidabilità merita oggi ancora più di ieri, di essere indagata. Bisogna investire nella ricerca. Si potrebbe quasi pensare come sia l'affidabilità stessa, *in primis*, a dover essere affidabile per riuscire nella propria missione.



## ❖ Bibliografia

- [1] BS EN ISO 9000:2015 Quality Management systems – Fundamentals and vocabulary.
- [2] Qualità-Treccani.it – Vocabolario Treccani online, Istituto dell'Enciclopedia Italiana.
- [3] Reliability Engineering Kaliash, C. Kapur, Michael Pecht, John Wiley & Sons, 28 April 2014.
- [4] Definizione di QFD, Total Quality Management, D.R. Kiran, 2017.
- [5] An Introduction to Reliability and Maintainability Engineering, Charles E. Ebeling, Waveland Presse, April 2019.
- [6] Introduction to Reliability Engineering, James E. Breneman, Chittaranjan Sahay, Elmer E Lewis, John Wiley & Sons, April 2022.
- [7] Highlights from the early (and pre-) History of reliability engineering, J.H. Saleh, K. Marais, Reliability Engineering & System Safety, Volume 91, Issue 2, February 2006, Pages 249-256.
- [8] EN 60300-3-1:2004 Dependability Management Part 3-1: Application guide - Analysis techniques for dependability – Guide on methodology.
- [9] Affidabilità nella progettazione di macchine, Carraro PA, Maragoni L, Pontefisso A, Zappalorto M, Dipartimento di Tecnica e Gestione dei sistemi industriali – DTG Corso di Costruzione di Macchine per Ingegneria Gestionale AA 2022/23, pagine 4-15.
- [10] Systematic failure mode effect analysis (FMEA) using fuzzy linguistic modeling, International Journal of Quality & Reliability Management, December 2005.
- [11] EN IEC 60812: 2018 *Failure Modes and Effects Analysis (FMEA and FMECA)*.
- [12] Fuzzy-FMEA risk evaluation approach for LHD machine – A case study, J. Balaraju, M. G. Raj, C. S. Murthy, Journal of Sustainable Mining, Volume 18, Issue 4, November 2019, Pages 257-268.

- [13] Criticality Assessment Models for Failure Mode Effects and Criticality Analysis Using Fuzzy Logic, *IEEE Transactions on Reliability*, vol. 60, no. 1, pp. 102-110, March 2011.
- [14] fuzzy, logica-Treccani.it – Vocabolario Treccani online, Istituto dell'Enciclopedia Italiana.
- [15] Fuzzy Set Theory---and its Applications, H. J. Zimmermann, Springer Science & Business Media, 27 June 2011.
- [16] Shipboard compressor system risk analysis by using rule-based fuzzy FMEA for preventing major marine accidents, B. O. Ceylan, *Ocean Engineering*, Volume 272, March 2023.
- [17] Application of Fuzzy logic to reliability engineering, J. B. Bowles, C. E. Pelaez, *Proceedings of the IEEE*, vol. 83, no. 3, pp 435-449, March 1995.
- [18] Reliability modelling and performance analyses of an LHD system in mining, B. Samanta, B. Sakar, S. K. Mukherjee, *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, Vol. 104, No. 1, January 2004.
- [19] Risk assessment of physical unit operations of wastewater treatment plant using fuzzy FMEA method: a case study in the northwest of Iran, *Environmental Monitoring and Assessment*, July 2022.