



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE

---

Dipartimento di Ingegneria

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Gestionale

**"Analisi della guastabilità dei mezzi elettrici  
della DR Marche e sviluppo di modelli  
affidabilistici volti a determinare politiche  
manutentive mirate a migliorarne l'affidabilità"**

" Analysis of the failure rate of electric vehicles of DR Marche  
and development of reliability models aimed at determining  
maintenance policies to improve their reliability. "

**Relatore:**  
Prof. Archimede Forcellese

**Candidato:**  
Roberto Maiozzi

**Correlatore:**  
Ing. Carmine Dazj

**Anno Accademico 2022-2023**

# Indice

<b>1</b>	<b>IMC Ancona Trenitalia S.p.A</b>	<b>7</b>
1.1	Cenni storici . . . . .	7
1.2	Descrizione dell'impianto . . . . .	7
1.2.1	OML-Officina Manutenzione Locomotive . . . . .	7
1.2.2	OMV-Officina Manutenzione Vetture . . . . .	9
1.2.3	MCPTC-Manutenzione Corrente Programmata Treno Completo . . . . .	9
1.3	Asset dell'impianto . . . . .	10
<b>2</b>	<b>L'ETR425</b>	<b>12</b>
2.1	Caratteristiche generali del veicolo . . . . .	12
2.2	Descrizione funzionale della catena di trazione . . . . .	13
2.3	Descrizione degli apparati . . . . .	16
2.3.1	Pantografo . . . . .	16
2.3.2	Convertitore di trazione . . . . .	17
2.3.3	Motore di trazione . . . . .	18
2.3.4	Convertitore ausiliario e carica batterie . . . . .	19
2.3.5	Impianto frenante . . . . .	20
2.3.6	Carrelli . . . . .	22
2.3.7	Sistema antincendio . . . . .	23
2.3.8	Sistema toilet . . . . .	26
2.3.9	Impianto condizionamento e trattamento aria . . . . .	29
2.3.10	Telediagnostica . . . . .	30
<b>3</b>	<b>La Manutenzione</b>	<b>34</b>
3.1	Definizione e funzione di manutenzione . . . . .	35
3.1.1	Manutenibilità e Disponibilità . . . . .	36
3.1.2	Politiche e tipologie di manutenzione . . . . .	37
3.1.3	Scelta della politica di manutenzione . . . . .	44
3.2	Manutenzione dei rotabili . . . . .	46
3.2.1	RSMS, Avvisi e Ordini . . . . .	47
<b>4</b>	<b>Teorie e concetti sull'affidabilità</b>	<b>48</b>
4.1	Definizione e tipologie di guasto . . . . .	48
4.2	Affidabilità e inaffidabilità . . . . .	51
4.3	Modelli di affidabilità . . . . .	53
4.3.1	Modello esponenziale negativo . . . . .	54
4.3.2	Modello di Weibull . . . . .	55
4.4	Tecniche decisionali multi-attributo o Multi-criterio . . . . .	62

4.4.1	Metodi a eliminazione o outranking . . . . .	64
4.4.2	Metodi grafici . . . . .	65
4.4.3	Metodi a punteggio . . . . .	65
4.4.4	Analytic Hierarchy Process . . . . .	66
<b>5</b>	<b>Reti neurali</b>	<b>68</b>
5.1	Applicazioni e proprietà . . . . .	70
5.2	Pregi e difetti . . . . .	71
<b>6</b>	<b>Caso di studio</b>	<b>72</b>
6.1	Analisi Telediagnostica . . . . .	72
6.2	Analisi Avvisi . . . . .	75
6.3	Analisi ordini di lavoro e materiali sostituiti . . . . .	79
6.4	Applicazione della Teoria di Weibull . . . . .	85
6.5	Proposta di miglioramento e analisi economico-finanziaria . . . . .	92
6.5.1	Analisi economica . . . . .	93
6.5.2	Analisi finanziaria . . . . .	99
6.5.3	Applicazione delle reti neurali . . . . .	103
<b>7</b>	<b>Conclusioni</b>	<b>108</b>
<b>8</b>	<b>Ringraziamenti</b>	<b>110</b>

## Elenco delle figure

1	Officina manutenzione locomotive . . . . .	8
2	Reparto ALE . . . . .	9
3	ETR425 o Jazz . . . . .	10
4	Pantografo ATR95 del Jazz . . . . .	16
5	Motore asincrono trifase 4 FXA 2824 . . . . .	18
6	Telaio cassa convertitore . . . . .	20
7	Disposizione carrelli rispetto al veicolo . . . . .	22
8	Vista laterale del carrello . . . . .	23
9	Valvola di sezione . . . . .	25
10	Valvola di taglio del sistema WC . . . . .	26
11	Schema funzionamento Telediagnostica . . . . .	30
12	Schema generazione avviso manutentivo . . . . .	31
13	Tipologie di manutenzione . . . . .	37
14	Andamento Manutenzione correttiva . . . . .	38
15	Andamento Manutenzione preventiva . . . . .	39
16	Programmazione a data costante . . . . .	41
17	Programmazione a età costante . . . . .	41
18	Andamento manutenzione predittiva . . . . .	43
19	Schema decisionale . . . . .	45
20	Andamento del tasso di guasto nel tempo . . . . .	50
21	Grafico affidabilità e inaffidabilità . . . . .	52
22	Zona centrale della curva . . . . .	54
23	Grafico di Weibull . . . . .	56
24	Metodo grafico per trovare $\eta$ . . . . .	57
25	Valori di $\beta$ nella curva a vasca da bagno . . . . .	58
26	Andamento della densità di probabilità al variare di $\beta$ . . . . .	59
27	Grafico andamento MTTF al variare di $\beta$ . . . . .	61
28	Scomposizione gerarchica nell'approccio AHP . . . . .	67
29	Schema di una rete neurale . . . . .	68
30	Cruscotto Qlik. . . . .	72
31	Esempio dati telediagnostica su Excel . . . . .	73
32	Eventi eliminati . . . . .	74
33	Esempio di raggruppamento in categorie . . . . .	74
34	Totale degli eventi per ogni impianto . . . . .	75
35	Schermata sistema informatico SAP . . . . .	76
36	Foglio Excel scaricato dal sistema . . . . .	76
37	Colonne per il calcolo dei tempi di attraversamento di un avviso	77
38	Schema del tempo di attraversamento . . . . .	79
39	Finestra Visualizzazione ordini di lavoro . . . . .	79

40	Colonne usate per il calcolo dei tempi di attraversamento . . .	80
41	Finestra lista movimenti merce per ordine . . . . .	81
42	Foglio elettronico dei materiali . . . . .	82
43	Materiali impiegati su ciascun impianto . . . . .	82
44	Materiali raggruppati per categorico con relativo costo . . . .	83
45	Matrice Multi-attributo . . . . .	84
46	Piano manutentivo . . . . .	85
47	Schermata per il calcolo delle percorrenze chilometriche . . . .	86
48	Tabella percorrenze chilometriche . . . . .	87
49	Grafico Weibull con valori negativi . . . . .	88
50	Grafico Weibull con valori positivi . . . . .	89
51	Tabella per il calcolo delle funzioni . . . . .	90
52	Grafico densità di probabilità . . . . .	90
53	Grafico del tasso di guasto $\lambda(t)$ . . . . .	91
54	Andamento funzione di affidabilità $R(t)$ e inaffidabilità $F(t)$ .	91
55	Tabella Chilometri percorsi durante il periodo di osservazione	92
56	Costo del fermo puro . . . . .	94
57	Scenario con manutenzione della valvola ogni 36 mesi . . . . .	95
58	Scenario con manutenzione della valvola ogni 27 mesi . . . . .	96
59	Tabella degli scostamenti tra realtà e primo scenario ipotetico	97
60	Scenario con manutenzione della valvola ogni 24 mesi . . . . .	98
61	Tabella degli scostamenti tra realtà e secondo scenario ipotetico	99
62	Tabella dei materiali utilizzati suddivisi per macro-categorie e treno . . . . .	100
63	Tabella macro-categorie materiali . . . . .	101
64	Tabella impatto scorte 36 mesi . . . . .	102
65	Tabella impatto scorte 24 mesi . . . . .	102
66	Foglio contenenti i dati per l'addestramento . . . . .	103
67	Finestra di selezione del modello . . . . .	104
68	Tabella di valori restituiti dalla rete . . . . .	105
69	Grafico restituito dalla rete neurale . . . . .	105
70	Grafico di Weibull ottenuto con i dati predetti dalla rete . . .	106

## Sommario

Durante il periodo di tirocinio presso la Direzione Regionale Marche di Trenitalia S.p.A., precisamente all’Impianto Manutenzione Corrente di Ancona (IMC di Ancona), è stato condotto uno studio incentrato sull’analisi della frequenza dei guasti e sull’incremento dell’affidabilità della flotta ETR425, comunemente conosciuta come JAZZ.

Nel contesto del trasporto ferroviario, è di vitale importanza garantire un livello adeguato di servizio. Il materiale rotabile rappresenta un sistema meccanico-elettrico estremamente complesso, composto da una vasta gamma di componenti, e anche un piccolo guasto può avere conseguenze significative per i passeggeri in termini di comfort ridotto e irregolarità nell’operatività, con conseguente perdita di competitività per l’azienda. A questo scopo, l’officina di manutenzione svolge un ruolo di enorme importanza, richiedendo un impegno costante e continuo per ridurre al minimo tali possibilità. L’obiettivo della manutenzione è quello di mantenere un livello elevato di affidabilità non solo intervenendo per correggere i guasti una volta che si sono verificati, ma soprattutto, quando possibile, prevedendoli in anticipo.

La flotta JAZZ è stata scelta tra l’intero parco mezzi perché rappresenta un obiettivo sfidante grazie alla sua giovane età e alla sua rinomata affidabilità, ma tuttavia al fine di perseguire un miglioramento continuo Trenitalia S.p.A cerca di lavorare per incrementare ulteriormente l’affidabilità.

Durante lo studio condotto, sono state identificate le aree o gli impianti che presentavano un numero significativo di guasti, evidenziando la necessità di incrementare l’affidabilità in tali specifici settori.

La tesi è stata organizzata in modo da fornire una panoramica generale dell’impianto e dell’ETR425 nei primi capitoli. Successivamente, sono stati esaminati gli argomenti teorici sull’affidabilità e i modelli probabilistici utilizzati, inclusi brevi accenni sulle reti neurali. Solo alla fine è stato affrontato il caso di studio vero e proprio.

La tesi è stata strutturata introducendo nei primi capitoli una descrizione generale dell’impianto e dell’ETR425, sono stati poi affrontati gli argomenti di teoria dell’affidabilità e dei modelli probabilistici utilizzati e un breve cenno sulle reti neurali, e successivamente è stato affrontato il caso di studio.

Lo studio è stato diviso in quattro punti principali:

- **Punto 1:** Analisi dello storico delle avarie, attraverso strumenti utilizzati dell’impianto (Sistema informativo gestionale e telerdiagnostica) per determinare quali fossero i componenti più critici.
- **Punto 2:** Sono stati ricavati, attraverso il modello di Weibull, valori come la "Funzione di affidabilità", la "Funzione di Inaffida-

bilità", il "Tasso di guasto" e il "MTTF (Main Time to Faiulure)" dei componenti critici individuati.

- **Punto 3:** I risultati ottenuti dei modelli sono stati poi utilizzati per sviluppare delle proposte di cambiamento e decidere quale strategia manutentiva attuare per un determinato componente al fine di aumentare l'affidabilità.
- **Punto 4:** Al fine di sviluppare un modello preliminare in grado di predire il MTTF (Mean Time To Failure) utilizzando reti neurali, è stato addestrato un modello semplice utilizzando dati provenienti dal modello di Weibull. Questo modello può essere ulteriormente perfezionato includendo più variabili, ma può già essere utilizzato da Trenitalia S.p.A per calcolare il MTTF di componenti simili presenti nelle flotte di mezzi di altre direzioni regionali, le quali potrebbero avere una maggiore affluenza di passeggeri.

# 1 IMC Ancona Trenitalia S.p.A

## 1.1 Cenni storici

La realizzazione dell'impianto di manutenzione di Ancona risale ai primi anni '70 ma, per via di una manutenzione sempre più crescente e dell'aumentare del numero di rotabili, alla fine degli anni '80, emerge la necessità di costruire un nuovo impianto capace di sfruttare spazi maggiori per la creazione di un'officina serializzata.

L'impianto nasce come IMC-Impianto di Manutenzione Corrente, ossia predisposto alla manutenzione corrente dei rotabili. Tale nomenclatura permane ancora oggi pure essendo variata la sua natura che viene appunto modificata negli anni 2000 quando si è deciso di dare avvio a un nuovo tipo di intervento manutentivo, molto più complesso, sui treni.

L'impianto di Ancona è infatti uno dei pochi in Italia ad effettuare la manutenzione ciclica su diversi tipi di rotabili. Questo tipo di manutenzione viene effettuata nelle officine OMC-Officine di Manutenzione Ciclica.

## 1.2 Descrizione dell'impianto

Il centro IMC Ancona è un impianto che si estende per una superficie di 165570 m<sup>2</sup> (di cui 34420 m<sup>2</sup> al coperto) adibito alla manutenzione e lavaggio di treni in composizione bloccata e non.

L'officina, dove viene effettuata l'attività di manutenzione, è suddivisa in tre aree principali: OML-Officina Manutenzione Locomotive, OMV-Officina Manutenzione Vetture e MCPTC- Manutenzione Corrente Programmata Treno Completo.

### 1.2.1 OML-Officina Manutenzione Locomotive

L'officina manutenzione locomotive è la parte dell'impianto che si occupa della manutenzione delle locomotive e dei mezzi leggeri come Jazz, Swing, Minuetto, Pop, Rock. Al suo interno sono presenti altre aree importanti:

- **Magazzino OML**

Il magazzino OML, o magazzino ricambi, è l'area in cui si stoccano e si forniscono i materiali e le attrezzature utili ad effettuare la manutenzione. Ha un'estensione di 3200 m<sup>2</sup> e contiene circa ottomila tipologie di articoli per un valore complessivo di circa 14 milioni di euro. I materiali al suo interno sono classificati in:



- Materiali di scorta, ossia quei materiali che, una volta sostituiti, vengono smaltiti;
- Materiali riparabili sono quei materiali che, una volta smontati, vengono riparati o revisionati. Questi materiali vengono suddivisi in: A) riparabili buoni RIPB-Revisionati o Riparati, ossia pronti per essere installati sui veicoli. B) RIPA ossia riparabili guasti smontati dai veicoli e destinati a revisione o riparazione.
- Materiali dismessi, ossia tutti quei materiali per cui è possibile la revisione o la riparazione, ma che non sono idonei in quanto rotti in maniera irreparabile oppure la loro riparazione avrebbe un costo pari al nuovo e non sarebbe conveniente effettuarla.

- **RS-Riparazioni Speciali**

Nel reparto Riparazioni Speciali o RS si effettuano operazioni particolari a componenti fuori opera e lavorazioni più pesanti che richiedono operazioni più lunghe. L'obiettivo principale di questo settore è quella di aumentare e garantire l'affidabilità e la sicurezza dei mezzi. Le operazioni che si eseguono sono: il rialzo della cassa, la sostituzione delle sale e dei carrelli, l'assemblaggio dei carrelli e delle sospensioni e in fine le modifiche di *retrofit*. Il reparto è composto da otto binari in cui vengono effettuate le suddette operazioni ( vedesi **Figura 1**).



Figura 1: Officina manutenzione locomotive

- **Reparto Trazione Elettrica o TE**

Terminate le operazioni in RS le locomotive passano nel Reparto TE-Trazione Elettrica caratterizzato dall'aver una linea elettrificata dove vengono svolte le ultime operazioni prima di effettuare la corsa prova.

- **Reparto ALE**

Tale reparto ospita i mezzi elettrici leggeri come il Minuetto e il Jazz per la revisione e le operazioni di manutenzione correttiva (vedesi **Figura 2**).



Figura 2: Reparto ALE

### 1.2.2 OMV-Officina Manutenzione Vetture

L'Officina Manutenzione Vetture è la parte dell'impianto che si occupa della revisione e della riparazione dei guasti di quelle vetture che andranno a comporre il treno.

Le vetture MD o vetture a media distanza si differenziano in MDVE (media distanza a vestiboli esterni), MDVC (media distanza vestiboli centrali) e Semi-Pilota. Queste ultime sono adibite alla trazione andando a lavorare in sincrono con la locomotiva e favorendone le manovre onde evitare l'inversione.

### 1.2.3 MCPTC-Manutenzione Corrente Programmata Treno Completo

L'area Manutenzione Corrente Programmata Treno Completo è quella in cui vengono effettuate le operazioni di manutenzione e di riparazione che non richiedono la scomposizione delle vetture dalla locomotiva.

### 1.3 Asset dell'impianto

Gli *asset* o veicoli associati all'impianto di Ancona comprendono diverse tipologie di rotabili come mezzi leggeri, locomotive e vetture. In questo caso la manutenzione viene effettuata su:

- **63 locomotive E464:**

locomotive elettriche, prodotte da Bombardier, utilizzate maggiormente sui treni a medio raggio, tuttavia possono essere utilizzate sui treni a corto raggio.

- **200 vetture a media distanza:** trattasi di carrozze per i servizi ferroviari con 84 posti a sedere.

- **22 vetture pilota:** trattasi, anche in questo caso, di carrozze per i servizi ferroviari, tuttavia, a differenza delle precedenti, queste hanno solo 48 posti a sedere per via della presenza della cabina di guida.

- **9 ATR220tr:**

soprannominati Swing, sono autotreni con motore diesel con 159 posti a sedere, prodotti da PESA. Vengono utilizzati nei tratti dove non è presente la linea elettrificata.



Figura 3: ETR425 o Jazz

- **4 EMU:**

elettrotreni prodotti da Alstom aventi 149 posti a sedere, denominati Minuetti. Essi sono la versione precedente del Jazz.

- **3 ETR521:**

soprannominato Rock, è un elettrotreno prodotto da Hitachi, costruito in composizione bloccata da 5 elementi, con configurazione a doppio piano.

- **4 ETR104:** soprannominato Pop, è un elettrotreno prodotto da Alstom. Si tratta di un elettrotreno a piano singolo 4 casse, dotato di 4 motori di trazione;

- **13 ETR425:**

mezzi leggeri più comunemente chiamati Jazz. Tali mezzi sono elettrotreni con piano ribassato e 308 posti a sedere prodotti da Alstom (vedesi **Figura 3**).

## 2 L'ETR425

### 2.1 Caratteristiche generali del veicolo

L'ETR425, comunemente chiamato Jazz, è un elettromotrice in servizio sulle linee italiane. Tale mezzo può raggiungere la velocità massima di 160 km/h con alimentazione a 3 Kv e 125 km/h con 1.5 Kv grazie ai 4 motori asincroni trifase (due per ogni elemento motore) di cui è dotato.

Questo veicolo è costituito da due elementi motorizzati, uno per ogni estremità, e da tre elementi rimorchio. Pertanto, abbiamo un totale di 5 elementi che si trovano in configurazione bloccata per una lunghezza totale di 82.2 metri. Il passaggio da un elemento all'altro è consentito grazie a intercomunicanti che sono protetti da mantici a tenuta.

Gli elementi che vanno a comporre l'ETR425 sono i seguenti:

- **A41** è uno dei due elementi motore di estremità;
- **A42** e **A45** sono due dei tre elementi intermedi;
- **A43** è l'elemento intermedio che al suo interno possiede la ritirata e una coppia di pantografi sul tetto;
- **A46** è l'altro elemento motorizzato che si trova sull'estremità opposta.

Gli altri aspetti fondamentali del veicolo sono:

- La struttura cassa (elemento) di larghezza pari a 2950mm rispondente alla sagoma limite prevista dalla Fiche UIC 505-1 (EBO G1) è realizzata in acciaio nel rispetto della limitazione sul massimo carico per asse di 18 ton.
- Gli ambienti passeggeri sono di tipo "a salone" con la possibilità di inserimento nei retrosedili di bagagli con limitato ingombro. Negli ambienti si ha un'ampia circolabilità interna ottenuta con larghi corridoi nelle zone di intercomunicazione fra gli elementi e fra i sedili (640 mm). Il livello di rumorosità all'interno del veicolo è basso a seguito delle soluzioni di isolamento termoacustico adottate e all'applicazione di manti "a *comfort* migliorato" nelle zone di intercomunicazione.

Il veicolo è attrezzato con una ritirata, la toilette, presente nell'elemento centrale.

- La sicurezza del veicolo contro i pericoli di incendio è elevata grazie alle scelte operate nella definizione dei materiali e al presidio dei vani contenenti le apparecchiature di un impianto antincendio.
- L'incarozzamento ed evacuazione del veicolo è rapido grazie a 5 ampie porte di accesso per fiancata a due vie di cui una con pedana di accesso per carrozzella HK, e vestiboli di salita con piano di calpestio posto a 650 mm dal p.d.f..
- Il veicolo è inoltre equipaggiato con due carrelli motore posti in corrispondenza delle cabine di guida e con 5 carrelli portanti passo 2700 mm posti in corrispondenza degli intercomunicanti. Ogni carrello motore è azionato da un proprio dispositivo di potenza per la trazione ("Power Pack").

## 2.2 Descrizione funzionale della catena di trazione

Per comprendere il funzionamento dell'ETR425 occorre analizzare la catena di trazione in modo da individuare tutti i componenti interessati a partire dal pantografo fino ad arrivare ai motori di trazione. La catena di trazione è quindi quell'insieme di componenti che permette il movimento del treno.

La suddetta catena di trazione è composta da:

- Un gruppo, formato da due pantografi, atto alla captazione della tensione e installato sulla rimorchiata centrale (A43).
- Un gruppo funzionante in alta tensione con il compito di interrompere il circuito (interruttore extra-rapido IR) e di precaricarlo in fase iniziale. Tale gruppo di alta tensione è sistemato in due cassoni (cassone IR e AT) sul tetto della rimorchiata centrale.
- Altri due cassoni sempre funzionanti in alta tensione. Ciascun cassone contiene un convertitore di trazione di tipo ONIX 223. Ogni convertitore è sistemato nel sottocassa di entrambe le motrici (A46 e A41) con la funzione di trasformare, comandare e controllare la tensione proveniente dalla linea ed alimentare opportunamente i quattro motori di trazione.
- Due reostati di frenatura raffreddati con ventilazione naturale, ciascuno dei quali è collocato sul tetto di entrambe le motrici.
- Quattro motori elettrici tipo 4FXA2842 sistemati a coppie su ciascuno dei carrelli motori situati agli estremi del veicolo. Ogni coppia di motori è collegata in parallelo e alimentata dal convertitore di trazione.

Si può notare una certa ridondanza nei componenti, questo per garantire il funzionamento del veicolo anche in caso di guasti, avarie o malfunzionamenti.

La captazione della tensione avviene tramite uno dei due pantografi che sono sistemati sulla rimorchiata centrale (A43). Il pantografo, connesso alla linea elettrificata, permette l'alimentazione a 3000v.

A valle dei pantografi sono presenti due scaricatori di tensione (PF1-PF2) che hanno il compito di proteggere i dispositivi di alta tensione da sovratensioni di origine atmosferica e di manovra. La condizione dei due scaricatori è controllata da due trasduttori di corrente. Tutti questi componenti sono sistemati all'interno della cassa AT ubicata sul tetto della rimorchiata centrale.

Sempre nella cassa AT, a valle dei due pantografi, sono presenti due sezionatori che permettono l'isolamento, in presenza di avaria, al pantografo o allo scaricatore interessato. Nella cassa AT sono presenti anche gli apparecchi AT che definiscono il circuito di precarica filtro e il circuito di tensione di linea. Il primo è composto da un fusibile, un contattore e una resistenza che permettono di caricare il filtro di linea, che a sua volta, è composto dall'induttore di linea sistemato sul tetto della rimorchiata A45.

Il secondo circuito è costituito dall'interruttore extrarapido (IR) e dal relativo dispositivo di scatto rapido, entrambi sistemati in una cassa sopra la rimorchiata A43. L'interruttore extrarapido si chiude quando la tensione ai capi del filtro è uguale alla tensione di linea. L'IR è un componente essenziale poiché, essendo posizionato immediatamente a valle del pantografo, con la sua apertura permette di isolare le catene di trazione dalla tensione di linea in presenza di malfunzionamento o sovracorrenti.

Inoltre sono presenti ulteriori protezioni come, ad esempio, i trasduttori (TAL-TAN), che misurano la differenza tra la corrente in ingresso alla catena di trazione e quella di ritorno, e aventi il compito di provocare l'apertura dell'interruttore extrarapido in caso di malfunzionamento.

Come precedentemente descritto, in parallelo al circuito AT ci sono i due rami della catena di trazione indipendenti tra loro (uno per ciascuna motrice) da cui sono derivate, in parallelo, le linee AT per l'alimentazione dei convertitori ausiliari collocati sia sul tetto delle motrici che su quello di una delle rimorciate intermedie.

I convertitori di trazione vengono quindi alimentati direttamente dalla tensione della catenaria.

La logica di funzionamento impone che prima di chiudere l'IR venga comandata la funzione di "precarica" del filtro. Con l'IR aperto si chiude il contattore di precarica e, tramite resistenze, si procede al caricamento del filtro di ingresso comune ai due convertitori di trazione. Attraverso questo processo si limita la corrente d'inserzione dell'IR. Quando l'IR viene chiuso, il

circuito di precarica è disconnesso e i convertitori di trazione sono abilitati a funzionare. Al presentarsi di un'eventuale avaria viene comandata l'apertura dell'IR. Al ripristinarsi della normale corrente d'ingresso avviene la chiusura dell'IR e, di conseguenza, l'alimentazione degli altri dispositivi AT (alta tensione) funzionanti.

L'IR è anche comandato in apertura quando si hanno delle sovratensioni sui moduli di potenza e quando la tensione di linea è inferiore a 1900 Vcc, ma dall'apertura dell'IR sotto carico devono trascorrere almeno 30 secondi prima che possa essere abilitata una nuova sequenza di chiusura dello stesso.

Nel sottocassa di entrambe le motrici (cioè sotto al treno) è presente un cassone convertitore contenente due azionamenti simmetrici (Inverter 1-2) ciascuno dei quali costituito da un *inverter* di trazione e un *chopper* di frenatura che permettono il controllo del relativo motore asincrono di trazione sistemato su un asse del carrello motore.

Questi cassoni sono muniti dell'intera elettronica di comando che ne permette il funzionamento e di un proprio sistema di raffreddamento dei moduli di potenza costituito da un impianto a circolazione forzata con fluido di raffreddamento (acqua + glicole) con scambiatore di calore e ventilatore. In caso di guasto ad un azionamento del convertitore di trazione, un sezionatore di esclusione permette il suo isolamento senza che venga influenzato l'altro azionamento e la stessa catena di trazione dell'altra motrice.

Un sezionatore, sistemato all'interno della cassa posta sotto ciascuna motrice, permette la messa a terra sia del convertitore di trazione che di quello dei servizi ausiliari.

I due azionamenti del convertitore di trazione dal punto di vista funzionale sono costituiti da una parte frenante (*chopper* e reostati di frenatura) e da una parte motrice (*inverter* trifase). In serie al *chopper* di frenatura è presente un reostato di frenatura che è posto sul tetto della motrice a ventilazione forzata. Il suddetto reostato è formato da due gruppi di resistenza. I gruppi di resistenza hanno il compito di dissipare l'energia che è stata prodotta dalla frenatura elettrica dei motori di trazione quando questa non viene dissipata dalla linea. In aggiunta hanno anche il compito di dissipare l'energia dovuta a sovratensioni presenti all'ingresso del convertitore di trazione.

L'elettronica di comando, in conclusione, permette il corretto pilotaggio dei quattro motori di trazione e la gestione dei malfunzionamenti delle catene di trazione.



## 2.3 Descrizione degli apparati

### 2.3.1 Pantografo

Il pantografo è l'elemento che collega il veicolo con la linea di tensione aerea ed è pertanto quell'elemento atto alla captazione della corrente.

Il pantografo (vedesi **Figura 4**) montato sul Jazz o ETR425 è del tipo ATR95 asimmetrico a spinta impressa dotato di due portastriscianti indipendenti. Come detto in precedenza sul Jazz ne sono presenti due, entrambi montati sull'imperiale dell'elemento A43.



Figura 4: Pantografo ATR95 del Jazz

Il pantografo, a treno spento, si trova appoggiato sull'imperiale. Per il suo innalzamento e il controllo della spinta statica che esercita sulla linea si utilizza un compressore che immette aria compressa nel motore pneumatico ad una pressione compresa tra 7 e 10 bar. Il compressore è azionato grazie alla corrente proveniente dalle batterie del treno, mentre il sistema motore pneumatico è costituito da una molla elastica ad aria.

L'abbassamento avviene per effetto gravitazionale del suo stesso peso una volta che viene depressurizzata l'aria nel motore pneumatico. Il suddetto abbassamento è contraddistinto da due fasi: la prima caratterizzata da un

veloce distacco per estinguere un possibile arco elettrico; la seconda fase è necessariamente più lenta in modo tale che il telaio del pantografo non vada a cadere di peso sull'imperiale, poiché a lungo termine potrebbe portare a rotture.

Inoltre, il pantografo è predisposto con il dispositivo A.D.D.-Automatic Dropping Device che consente di abbassare rapidamente il pantografo stesso quando si verifica la rottura di uno strisciante o quando si verifica una eccessiva usura dell'elemento di contatto con la linea aerea.

Il pantografo è anche provvisto del dispositivo di rilevamento usura dello strisciante, che consente di segnalare il raggiungimento del limite di usura dell'elemento strisciante.

### 2.3.2 Convertitore di trazione

Il convertitore di trazione fa parte dell'intero azionamento di trazione del treno. Esso si basa sulla tecnologia ONIX 223 ed è composto da convertitori di potenza a semiconduttori, da condensatori, da elettronica di controllo e dal sistema di raffreddamento nonché da altri elementi passivi. Tutto questo, come detto in precedenza, è sistemato in una cassa nel sottocassa di ciascuna motrice.

Il sistema di trazione, basato sulla tecnologia ONIX, può essere scomposto in tre sottogruppi funzionali:

- Distribuzione dell'energia: comprende l'interruttore extrarapido, la gestione della linea tetto ed il circuito di precarica.
- Filtraggio della corrente assorbita.
- Trasformazione dell'energia: la sua funzione principale è quella di trasformare la tensione continua di linea in una tensione trifase per alimentare i motori asincroni di trazione. Comprende i convertitori di trazione ONIX 223, i reostati di frenatura e i motori di trazione.

Per poter effettuare le azioni di manutenzione, la cassa, suddivisa in due aree, è stata progettata con degli appositi sportelli per favorirne l'accesso. In una di queste aree è installato l'equipaggiamento elettrico, mentre l'altra è un'area ventilata dove sono presenti componenti del sistema di raffreddamento.

In particolare il convertitore è composto da due componenti che sono:

- *Inverter*: è il componente che ha la funzione di convertire la tensione continua di linea in una tensione trifase per i motori.
- *Chopper* di frenatura: ha il compito di dissipare l'energia di frenatura nel caso non sia possibile restituirla alla linea.

### 2.3.3 Motore di trazione

Il veicolo è equipaggiato con motori asincroni trifase tipo 4 FXA 2842 (vedi **Figura 5**) a quattro poli con rotore a gabbia di scoiattolo a ventilazione forzata per un peso totale di 1040 Kg a motore.

In totale si hanno quattro motori montati due per ogni carrello motore, con un motore per ogni *inverter*.

Il motore trasmette il movimento alle ruote tramite un riduttore a ingranaggi che reaa un voluto rapporto di trasmissione. Tra il motore e il riduttore è posto un giunto che supporta il movimento relativo tra i due.

L'avvolgimento dello statore è costituito da spire a diamante, partendo da un conduttore di rame a piattina. A loro volta le spire sono inserite nelle cave dello statore protette da un rivestimento.

Il rotore è costituito da un pacco di lamierini magnetici isolati uno dall'altro. Esso è montato a caldo su un manicotto e premuto tra due piastre terminali.

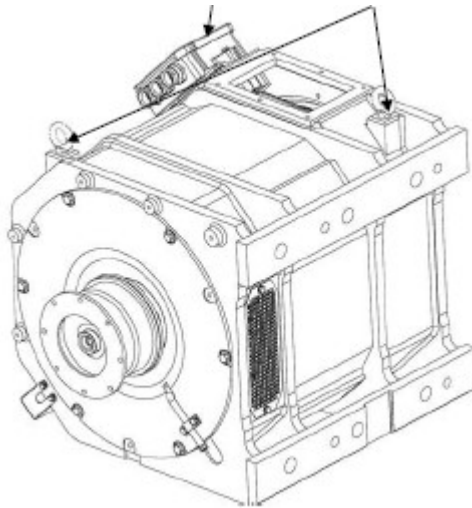


Figura 5: Motore asincrono trifase 4 FXA 2842

La gabbia del rotore è composta di anelli e barre in lega di rame collegati mediante brasatura a induzione ad alta frequenza. Gli anelli di rame al cromo-zirconio sono forgiati nelle dimensioni richieste e trattati a caldo per garantirne le caratteristiche meccaniche finali.

Il motore di trazione è un motore aperto a ventilazione forzata attraverso il suo apposito *package* di ventilazione. Questo *package* è montato su entrambi gli elementi motori (A41 e A46) ed è essenzialmente costituito da una struttura in acciaio, pannelli e due ventilatori a trasmissione diretta, il tutto azionato da un motore elettrico.

### 2.3.4 Convertitore ausiliario e carica batterie

Il convertitore ausiliario da 90 kVA (kilo Volt-Ampere) è stato progettato e costruito per essere installato sul tetto delle due motrici A41 e A46. Il sistema è direttamente alimentato dalla catenaria di trazione (tensione di linea nominale sia a 3 KVcc e 1.5 KVcc) e fornisce l'alimentazione:

- alle utenze in media tensione (3x380 Vrms).
- alle utenze in bassa tensione (24 Vcc).

In un unico convertitore, per motivi di riduzione peso e dimensione, sono stati integrati *l'inverter* dei servizi ausiliari e del carica batteria. Le principali caratteristiche del convertitore sono la sicurezza, l'affidabilità, il peso molto contenuto e fatto che non vi sia la presenza di alcun rumore e il convertitore stesso sia da un lato protetto dall'eventualità d'incendio e dall'altro di facile manutenzione.

Il carica batterie è realizzato con una tecnologia IGBT e le sue funzioni principali sono:

- alimentare le utenze di bordo a 24 Vcc.
- Caricare la batteria seguendo una determinata regolazione. Infatti la batteria viene caricata a corrente costante fino in prossimità della tensione di fine carica poi a tensione costante in funzione della temperatura della batteria.
- Garantire l'isolamento galvanico mediante un trasformatore ad alta frequenza.

Un regolatore del carica batterie effettua il disinserimento di quest'ultimo tramite un interruttore tripolare, mentre si avvia automaticamente quando riconosce la presenza dell'alimentazione in media tensione (MT).

Il modulo carica batterie e le relative batterie sono elementi fondamentali per il funzionamento del treno, infatti, come già detto, danno energia ai circuiti in bassa e media tensione (BT e MT). Tale importanza è data dal fatto che un loro eventuale malfunzionamento andrebbe a bloccare il treno, anche se connesso alla linea, creando un disservizio di trasporto. Allo stesso modo il compressore che alza i pantografi viene alimentato dalle stesse batterie, di conseguenza se queste ultime fossero scariche non sarebbe possibile effettuare la connessione del treno alla linea.

Il convertitore ausiliario e il carica batterie, come detto in precedenza, si trovano sopra il tetto delle motrici e sono alloggiati all'interno di un'unica cassa (vedesi **Figura 6**). La cassa è fissata sul tetto e non è equipaggiata

di carena con conseguente sua esposizione a tutti gli agenti atmosferici e all'irraggiamento solare.

Per evitare quest'ultimo gli sportelli sono dotati di pannelli anti-irraggiamento per evitare situazioni di alta temperatura nella cassa convertitore. Il telaio è realizzato in lamiera di acciaio inox e, per limitare il peso dell'intera cassa, gli sportelli sono in lega leggera. Il telaio è diviso in comparti per ospitare i moduli *chopper*, *inverter*, il carica batteria, il trasformatore, i filtri e i quadri elettrici.

Gli sportelli e il telaio sono pedonabili; inoltre il telaio possiede anche quattro punti per il sollevamento e la movimentazione dell'apparecchiatura completa.

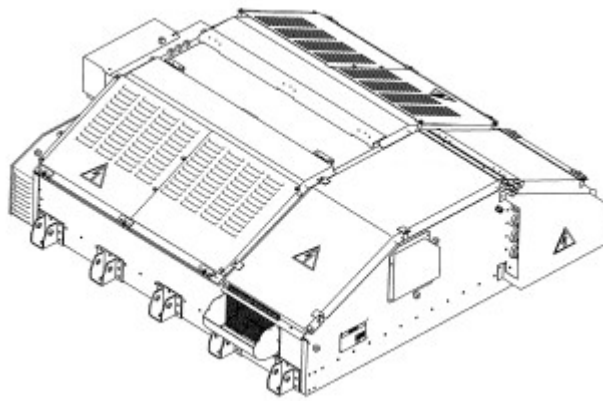


Figura 6: Telaio cassa convertitore

### 2.3.5 Impianto frenante

Per il Jazz sono previsti diversi tipi di freno:

- **Freno elettrodinamico:** In presenza del comando di frenatura per velocità superiori 20 km/h sui carrelli motore si attiva il freno elettrodinamico. Sotto i 10 km/h il freno elettrodinamico viene escluso e la frenatura è eseguita solo con il freno pneumatico.
- **Freno pneumatico automatico:** Il freno pneumatico automatico è un tipo di freno inverso, ossia ad accumulo di energia, ed è in grado di assicurare da solo la frenata negli spazi previsti. E' un freno che agisce su tutti i carrelli, sia che siano motori o che siano rimorchiati. Il freno pneumatico automatico possiede inoltre tre elementi fondamentali, ossia:

- Il rubinetto di comando di tipo autoregolatore, che serve per il comando della frenatura elettrodinamica e pneumatica, installato in ogni cabina di guida.
- Il distributore del freno di tipo UIC, ognuno dei quali premette l'alimentazione dei cilindri freno di ciascun carrello con relativo serbatoio ausiliario.
- La condotta del freno o condotta generale che percorre il veicolo da una testata all'altra.

Questo freno ha la particolarità di ottenere potenza frenante grazie all'energia disponibile sotto forma di aria compressa tramite le singole apparecchiature presenti nei vari elementi del veicolo (distributori freno, serbatoi ausiliari). Tale energia pneumatica viene utilizzata dal macchinista provocando una diminuzione di pressione nella condotta generale: la caduta di pressione nella condotta generale rappresenta il comando che il distributore utilizza per convogliare l'aria dai serbatoi ausiliari ai cilindri freno. Il sistema è automatico, pertanto, in caso di rottura della condotta generale, il freno entra automaticamente in azione.

- **Freno di parcheggio a molla:** Il freno di parcheggio a molla è un freno ad accumulo di energia realizzato con le porzioni a molla dei cilindri freno. Il freno di parcheggio a molla agisce sui primi due carrelli degli elementi di testa A41 e A46.

L'inserzione o la disinserzione del freno di parcheggio avviene mediante l'energizzazione/disenergizzazione delle elettrovalvole bistabili installate sul gruppo apparecchiature pneumatiche.

L'ETR425 è dotato di diversi modi di frenatura, che vengono realizzati utilizzando i diversi tipi di freno che ha a disposizione:

- **Frenatura di servizio:** E' un metodo di frenatura ottenuto con l'impiego combinato del freno elettrodinamico e del freno pneumatico automatico. Normalmente è utilizzato per controllare il movimento del veicolo ed arrestarlo in modo sicuro, rapido ed efficace, in qualsiasi condizione di velocità e di carico.
- **Frenatura di emergenza:** E' un tipo di frenatura ottenuto con l'impiego del freno pneumatico automatico e utilizzato per fermare il veicolo in modo sicuro, rapido ed efficace, in qualsiasi condizione di velocità e di carico.

- **Frenatura di parcheggio:** La frenatura di parcheggio è ottenuta con l'impiego della porzione a molla dei cilindri freno ed è utilizzata per mantenere immobile il veicolo anche in assenza del conducente.

### 2.3.6 Carrelli

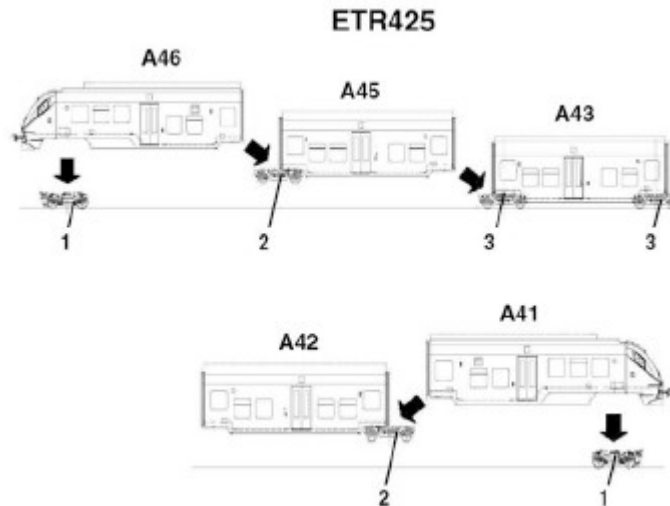


Figura 7: Disposizione carrelli rispetto al veicolo

L'ETR425 è composto, come già detto, da cinque elementi in configurazione bloccata. Questi elementi, dei quali due motrici e tre rimorchiati, sono appoggiati su sei carrelli. Due di questi ultimi sono carrelli motore e quattro sono portanti.

Le motrici A46 e A41 sono appoggiate con la parte aerodinamica su un carrello motore, mentre l'altra estremità è appoggiata su metà carrello portante. Gli elementi che seguono le motrici (A42 e A45) e l'elemento centrale (A43) poggiano entrambe le estremità su metà carrello portante (vedesi **Figura 7**).

Il carrello è una delle parti fondamentali del treno perché ne determina le caratteristiche funzionali e i costi di manutenzione. Per tale motivo il carrello deve soddisfare dei requisiti molto elevati in termini di sicurezza al deragliamento, *comfort* e stabilità di marcia, forze di trazione e frenatura. Pertanto, richiede un'analisi molto attenta del principio costruttivo focalizzata soprattutto su una velocità fino a 160 km/h e l'impiego di tecnologia e componenti di sperimentata affidabilità (vedesi **Figura 8**).

Naturalmente ci sono anche dei requisiti che il carrello deve rispettare come, ad esempio, la qualità della marcia, l'elevato sfruttamento della forza

di trazione, il peso ridotto e eliminazione dei punti di debolezza che causano sollecitazione limite.

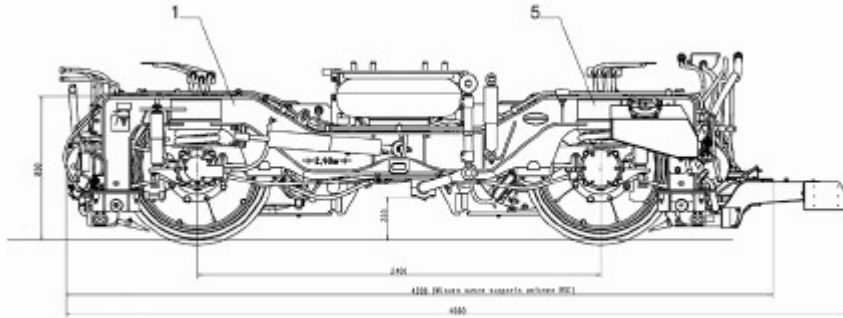


Figura 8: Vista laterale del carrello

I carrelli motori sono collegati con gli elementi motrici con accoppiamenti di diversa natura:

- **Accoppiamento elettrico:** Questi accoppiamenti sono realizzati con dei connettori per facilitare l'innesto e il disinnesto dei vari sensori e antenne. Diversamente il cavo di messa a terra e il cavo di alimentazione (alta tensione) del motore di trazione sono saldamente collegati alla cassa.
- **Accoppiamento pneumatico:** Gli accoppiamenti di tipo pneumatico sono rappresentati dalle tubazioni di alimentazione pneumatica dei freni, degli ugelli e l'olio degli ugelli ungiabordo, delle sabbiere anteriori e posteriori e della sospensione automatica.
- **Accoppiamento meccanico:** L'ammortizzatore anti-serpeggio, l'ammortizzatore verticale secondario e perno cassa con blocco di trazione sono alcuni dei tipi di connessione meccanica che possiamo trovare.

Per quanto riguarda la connessione tra carrello portante e cassa si hanno gli stessi tipi di collegamento o accoppiamento.

### 2.3.7 Sistema antincendio

Il veicolo è dotato, per la prevenzione e protezione da incendio, di sicurezze attive e sicurezze passive.

Le sicurezze passive sono tutti quei materiali non metallici, appartenenti alla categoria dei prodotti non combustibili e comunque non facilmente



inflammabili ed auto-estinguenti, che vengono utilizzati come rivestimento nell'arredamento della cassa e nella sua costituzione.

Per quanto concerne le sicurezze attive, esse si riferiscono al fatto che ogni elemento è dotato di impianto di rilevamento e spegnimento incendio automatico montato all'interno dei cassoni che contengono le apparecchiature AT (Alta tensione). Nei comparti passeggeri e nelle cabine di guida sono presenti degli estintori omologati e martelletti frangi vetro.

Le porte di salita e discesa sono dotate sia internamente che esternamente di maniglie di emergenza.

Tutto l'impianto consta di un sistema di rilevamento incendio abbinato ad un sistema di estinzione nebulizzata con una miscela di acqua, liquido anticongelante *Temper S* ed azoto. L'incendio viene rilevato grazie a rilevatori di fumo (SD) installati nella cabina di guida, negli elementi passeggeri e nel modulo toilette. Questi rilevatori di fumo sono distribuiti in tutto l'elemento e vengono sistemati in posizioni strategiche per garantire il rilevamento di fumo in tutto il veicolo.

Nelle Unità di azionamento del veicolo il rilevamento dell'incendio ha luogo mediante un rilevatore termico lineare LHD. Quest'ultimo consiste in una conduttura formata da due fili isolati separatamente. La conduttura è posizionata in ogni punto dove è possibile che si sprigioni un incendio o dove il calore potrebbe causare danneggiamenti al motore.

In caso di incendio, l'isolamento della conduttura si fonde. I due fili entrano allora in contatto tra di loro generando un corto circuito che viene misurato dal rilevatore di fumo tramite una cassetta di distribuzione. Coerentemente con quanto detto, si realizza un impianto completamente meccanico-pneumatico ed autonomo per quel che riguarda sia l'impianto rilevatore sia quello erogatore. I componenti elettrici sono impiegati per la sola trasmissione di comandi (da fiancata e da cabina) e segnali da un elemento all'altro o da un veicolo all'altro. Questo permette di avere ciascun impianto antincendio automatico funzionante anche nel caso di guasto all'impianto elettrico o di veicolo fermo.

Per le aree passeggeri, sull'imperiale dell'elemento A43 è installato un sistema con un cilindro erogante liquido estinguente nebulizzato. Il cabinato modulare invece comprende due cilindri ripieni di agente estinguente composto, come detto in precedenza, da acqua pura demineralizzata e liquido anti-congelante *Temper S* a pressione atmosferica e da due cilindri di azoto ad una pressione di 200 bar.

Vi è anche la presenza un terzo cilindro di azoto che invece è localizzato nel modulo di estinzione dell'area tecnica, questo perché, dove ci sono apparecchiature elettriche in alta tensione, erogare dell'acqua porterebbe solo altri

danni, pertanto viene usato l'azoto per andare a spegnere l'incendio andando a togliere l'aria.

Su ogni cilindro di azoto è montato un pressostato che rileva eventuali perdite di pressione.

Il box modulare che contiene i cilindri è collegato alla tubazione principale in acciaio, che è asciutta ed esente da pressione. Nella tubazione ci sono poi dei supporti per gli ugelli ad alta pressione che erogano il liquido estinguente nebulizzato.



Figura 9: Valvola di sezione

In caso di incendio su un solo elemento del treno, per evitare che il liquido estinguente venga erogato in tutto il treno, la tubazione è dotata di valvole di sezione (vedesi **Figura 9**) che permettono di isolare le parti non interessate. In ogni elemento del treno e nella toilette è presente una valvola di sezione il cui controllo è collegato al rilevatore di fumo.

Pertanto, in caso di incendio, il rilevatore del fumo comanda l'apertura del cilindro dell'azoto. L'azoto scorre nel cilindro dell'acqua andando a formare un agente estinguente che, scorrendo attraverso la tubazione, arriva fino all'ugello di erogazione dell'elemento interessato dall'incendio. Il flusso dell'agente estinguente viene controllato dalla valvola di sezione, in maniera che raggiunga solo l'elemento (o il modulo toilette) dove è stato rilevato l'incendio.

### 2.3.8 Sistema toilet

Sul veicolo è stata prevista l'installazione di un solo modulo sanitario con sistema WC (Sistema toilette). Il sistema Toilette è composto da diversi blocchi funzionali:

- **Unità di controllo e comando:** E' una centralina che si occupa di controllare entrate e uscite del sistema e di ottenere un regolare ed efficiente servizio del sistema che comanda tutte le funzioni dei singoli componenti facenti parte del circuito.
- **Sistema WC a vuoto:** comprende tutti quei componenti che permettono lo scarico e l'immagazzinamento in un serbatoio dei reflui. Il tutto è collegato con la centralina (unità di controllo e comando) per fornire tutte le informazioni necessarie sullo stato del sistema.

Il componente principale del WC a vuoto è naturalmente la tazza, ma su di essa sono installati vari accessori e componenti che completano la funzionalità del sistema:

- **Valvola di taglio:** Questa valvola (vedesi **Figura 10**), di solito chiusa, è controllata da un attuatore pneumatico a doppio effetto. Si trova tra l'uscita della tazza e il serbatoio dell'acqua sporca e ha il compito di isolare questi due elementi. Il corpo della valvola è realizzato in acciaio inossidabile e all'interno è presente uno strato auto-lubrificante.

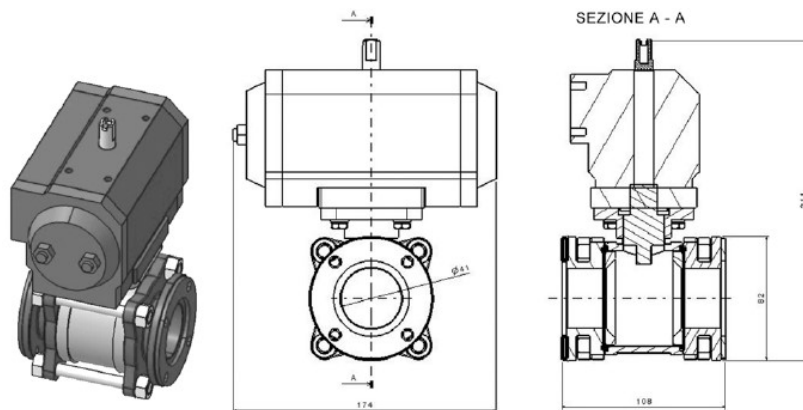


Figura 10: Valvola di taglio del sistema WC

La valvola si apre quando viene premuto il pulsante del WC e quando il livello di vuoto nel serbatoio dell'acqua sporca è corretto. Quando si apre, permette il facile passaggio del materiale

dalla tazza al serbatoio. La valvola si chiude quando la tazza si è svuotata. È stata progettata in modo tale che durante l'apertura e la chiusura si sollevi e si abbassi contemporaneamente per evitare intasamenti interni.

- **Sonda di livello della tazza:** La sonda di livello della tazza è costituita da due parti metalliche fissate alla tazza, che utilizzano la conduzione elettrica per rilevare la presenza di acqua. Quando le parti metalliche della sonda entrano in contatto con l'acqua, la sonda invia un segnale al pannello di controllo indicando il "Livello tazza massimo". In questo caso, il sistema viene messo fuori servizio, ma è possibile eseguire altri cicli senza lo scarico dell'acqua, nel tentativo di sbloccare la tazza e ripristinare il corretto livello dell'acqua.
- **Scatola elettrica della sonda di livello:** Il controller elettrico funge da collegamento tra la sonda di livello e il pannello di controllo. Esso fornisce tensione alla sonda e genera il segnale digitale che viene inviato al pannello di controllo. La scatola del controller è collegata alla sonda tramite un connettore elettrico ed è fissata al supporto della tazza.
- **Pompa dell'acqua:** Si tratta di una pompa a membrana attivata dall'aria compressa, il cui compito è di trasportare l'acqua fino alla tazza. La pompa preleva l'acqua dal serbatoio dell'acqua pulita e la invia agli spruzzatori quando l'aria compressa viene attivata. La capacità della pompa è di 0,2 litri ed è utilizzata due volte per ogni ciclo, scaricando un totale di 0,4 litri per ciclo. L'acqua entra nella pompa dalla parte inferiore e si accumula al suo interno. Quando l'elettrovalvola della pompa viene attivata e l'aria entra nella pompa, la membrana interna viene spinta verso il basso, spingendo anche l'acqua verso gli spruzzatori della tazza.
- **Valvola unidirezionale:** Il sistema include una valvola unidirezionale con un diametro di 3/8". L'acqua entra nella pompa attraverso questa valvola, che impedisce il suo ritorno verso il serbatoio dell'acqua pulita.
- **Spruzzatori:** La tazza è dotata di tre spruzzatori il cui scopo è pulire la tazza utilizzando l'acqua fornita dalla pompa. Questi spruzzatori sono componenti metallici che presentano un piccolo foro di uscita. L'acqua, spinta dalla pressione, fuoriesce attraverso i fori degli spruzzatori per pulire gli interni della tazza da eventuali residui. Gli spruzzatori sono collegati alla tazza mediante

un sistema di fissaggio speciale che li connette al tubo dell'acqua proveniente dalla pompa.

- **Manichetta di connessione:** La manichetta è un componente che consente di collegare il pannello di controllo alla tazza. Da un lato, la manichetta è collegata alla scatola elettrica della sonda di livello e alla sonda di livello della tazza. Dall'altro lato, è dotata di un connettore che permette la connessione con il pannello di controllo.
- **Valvola automatica ad azionamento pneumatico:** Si tratta di una valvola di controllo della portata a due vie, con un diametro di 3/8", dotata di una molla interna. Questa valvola è installata all'uscita della pompa dell'acqua. Quando la pompa viene attivata, l'aria compressa proveniente dal sistema pneumatico agisce sulla molla, facendola retrarre e consentendo il passaggio dell'acqua proveniente dalla pompa verso gli spruzzatori. All'interno della valvola è presente un apposito silenziatore che riduce il rumore generato dal flusso dell'aria compressa.

- **Accessori circuito pneumatico:** i componenti accessori del circuito pneumatico permettono la distribuzione e assicurano il corretto stato dell'aria a pressione che serve per azionare l'impianto di svuotamento del sistema. Forniscono aria compressa alle due elettrovalvole, di cui una che comanda la pompa dell'acqua del sistema e una seconda che gestisce la valvola di interruzione a vuoto.

Il sistema entra in funzione quando l'utente preme il pulsante di scarico seguendo un ciclo di funzionamento costituito dai seguenti passi:

- La pompa a membrana dell'acqua scarica  $0,20 \pm 0,05 \text{ dm}^3$  di acqua nella tazza.
- Il livello di vuoto all'interno del serbatoio dell'acqua sporca deve raggiungere il valore preimpostato (livello di vuoto predeterminato  $< -25 \text{ kPa}$ ). Se il livello di vuoto non raggiunge il valore desiderato, il sistema attiva automaticamente l'eiettore del sistema a vuoto.
- Il sistema apre la valvola di taglio, permettendo così il trasporto dei residui presenti nella tazza verso il serbatoio dell'acqua sporca.
- Il sistema chiude la valvola di taglio.
- Se il livello di vuoto all'interno del serbatoio dell'acqua sporca diminuisce al di sotto di  $-20 \text{ kPa}$ , il sistema attiva automaticamente l'eiettore del sistema a vuoto.

- Il sistema attiva la valvola dell'acqua e la pompa a membrana scarica nuovamente  $0,20 \pm 0,05 \text{ dm}^3$  di acqua nella tazza. Il sistema è ora pronto per eseguire il ciclo successivo.

### 2.3.9 Impianto condizionamento e trattamento aria

Questo paragrafo descrive la struttura del condizionamento dell'unità aria (HVAC) e fornisce le caratteristiche dell'impianto nel comparto passeggeri e nella cabina. L'aria condizionata è un monoblocco montato sul tetto. Tutti i componenti sono autosufficienti all'interno dell'unità HVAC che è situata sul tetto del veicolo. Su quest'ultimo sono presenti tre aperture per i condotti dell'aria:

- Aria di ritorno: il ricircolo all'interno del salone.
- Fornire aria: l'aria condizionata dell'HVAC al salone.
- Aria fresca: supplemento all'aria fresca al salone

Il collegamento delle aperture tra la HVAC e la macchina è realizzato attraverso i condotti rigidi nel tetto del salone. L'HVAC ospita anche l'unità di controllo della temperatura e due quadri elettrici. Ogni quadro elettrico include quanto segue:

- Unità di Controllo Temperatura: questo componente comprende l'*hardware* e il *software* che consentono di regolare l'aria condizionata nel salone e le operazioni automatiche dell'HVAC.
- Quadro elettrico I e II: questi componenti includono tutto l'*hardware* per la trasmissione di potenza e la sicurezza (contattori, relè, etc.).

La funzione di riscaldamento è gestita dalla combinazione di due elementi separati:

- *Overhead* (ventilato) riscaldatori: sono due unità di riscaldatori all'interno dell'unità HVAC.
- Statico (non ventilato) riscaldamento al pavimento: sono combinazioni di quattro tipi di riscaldatori al pavimento all'interno del salone.

La regolazione della temperatura utilizza tre sensori di temperatura. Un sensore di temperatura si trova vicino l'apertura dell'aria fresca e un altro si trova vicino l'apertura dell'aria di ritorno nell'unità HVAC. Il terzo infine si trova all'interno della parete del salone.

Le modalità di funzionamento (riscaldamento, ventilazione e aria condizionata) e la temperatura (set-point,  $\pm 2^\circ \text{C}$ ) sono selezionabili dal personale responsabile attraverso interruttori speciali sulla *console di comando*.

L'unità HVAC esegue automaticamente la ventilazione, il raffreddamento e la modalità di riscaldamento in base al punto di settaggio della temperatura e delle condizioni interne della cabina. La regolazione della temperatura viene fatta automaticamente dalla TCU. Il *software* di regolazione comanda l'unità di climatizzazione in modalità raffreddamento, riscaldamento o ventilazione, quando necessario. In caso di guasto, come la perdita di raffreddamento o di riscaldamento, l'unità HVAC è in grado di passare in ogni caso alla modalità di ventilazione.

### 2.3.10 Telediagnostica

La telediagnostica o diagnostica a "distanza" è un sistema che consente, come accade nelle auto di moderna generazione, di monitorare durante l'esercizio il funzionamento e lo stato in tempo reale del rotabile.

Il sistema è composto da un insieme di moduli che filtrano, elaborano e poi aggregano i segnali provenienti da moltissimi sensori di diverso tipo (elettrici, rilevatori di fumo ...) che sono collocati in tutto il treno negli impianti principali. Su ciascun rotabile è installata una centralina che raccoglie tutti i dati e, tramite un'antenna, li invia ad un server a terra che li storicizza e li elabora rendendoli fruibili agli utenti in remoto tramite appositi cruscotti (vedesi **Figura 11**).

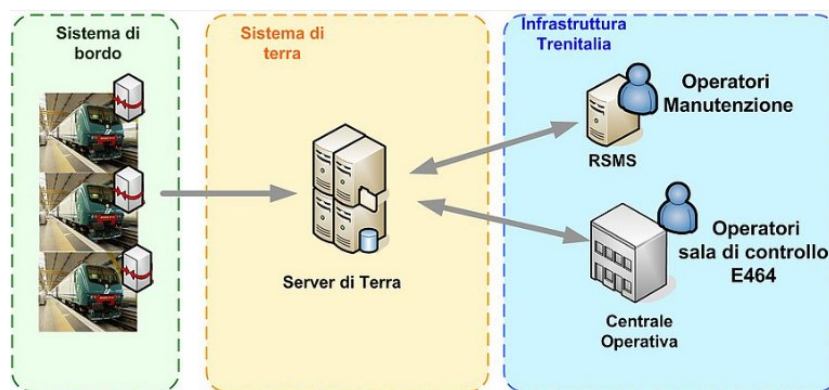


Figura 11: Schema funzionamento Telediagnostica

Questo tipo di sistema, applicato nella sua fase iniziale ai treni ad alta velocità, è stato applicato anche alle locomotive E464 e su tutti i Jazz che viaggiano sulle linee italiane. Tale sistema è un primo passo significativo in

direzione di una manutenzione dinamica e predittiva. Pertanto risulta essere un passaggio cruciale verso un'attività di tipo innovativo basata su analisi predittive e *on condition*.

Nelle fasi successive del progetto di telediagnostica saranno disponibili nel tempo sistemi di terra diagnostici sempre più avanzati, algoritmi predittivi molto più precisi per identificare eventuali malfunzionamenti o avarie, nonché funzioni molto evolute di calcolo dell'usura dei componenti e strumenti di ottimizzazione della pianificazione necessari per erogare un servizio più efficiente che risponda in maniera soddisfacente alle esigenze di tutti i pendolari.

La principale funzione della telediagnostica è quella di generare, in maniera automatica, un avviso manutentivo attraverso l'elaborazione dei segnali che la centralina riceve dai vari sensori che si trovano diffusi nel treno. Questi segnali vengono elaborati in base a delle logiche complesse o liste di regole, dette anche algoritmi diagnostici(AD), che sono definite, verificate e valutate da manutentori e progettisti (vedesi **Figura 12**).

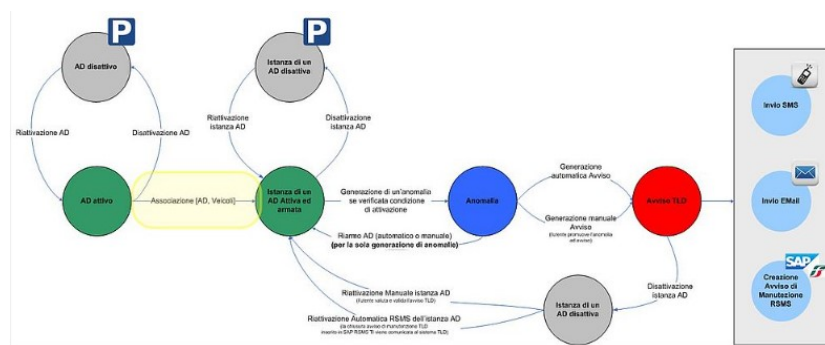


Figura 12: Schema generazione avviso manutentivo

Le funzionalità del sistema diagnostico sono associabili a tre processi importantissimi che sono: esercizio, manutenzione e ingegneria. Per ognuna di questi processi il sistema diagnostico rende disponibili le seguenti funzioni :

- **Funzioni per l'esercizio**

- Funzione di remotizzazione banco di manovra: permette di visualizzare in tempo reale lo stato del treno sui monitor del banco di manovra, questo supporta il personale di macchina nelle situazioni più o meno critiche.
- Funzione di monitoraggio della flotta: come detto in precedenza, grazie a cruscotti, è possibile monitorare la flotta fornendo la po-



sizione, i parametri di esercizio e le indicazioni su eventuali guasti presenti sul veicolo.

- **Funzioni per la manutenzione**

- Funzione di generazione automatica degli ordinativi di lavoro: attraverso gli algoritmi diagnostici (AD), il sistema permette di rilevare automaticamente eventuali guasti (diagnosticabili) indicando anche quale componente sostituire. La telediagnostica notifica la necessità dell'intervento manutentivo al sistema gestionale (SAP RSMS) riducendo così i tempi di diagnosi e di approvvigionamento delle parti di ricambio e attrezzature riducendo di conseguenza i tempi di riparazione.
- Funzione di analisi del comportamento fisico dei sottosistemi: attraverso gli appositi ambienti grafici di lavoro e configurazione è possibile effettuare delle indagini su delle grandezze fisiche (es. temperatura pressione ecc...). Queste analisi consentono di ricercare guasti di complessità maggiore senza la necessità di effettuare corse prove dedicate che sarebbero comunque utili, ma richiederebbero una tempistica di esecuzione maggiore.

- **Funzioni per l'ingegneria**

- Funzione di estensione remota della diagnostica di veicolo: attraverso un sistema di configurazione remota è possibile estendere ed elaborare le informazioni diagnostiche del veicolo aggiungendo contatori e nuovi eventi diagnostici senza modificare i *software* di controllo/diagnosi del rotabile.
- Funzione di monitoraggio della vita utile dei componenti: grazie all'utilizzo dei contatori è possibile effettuare un monitoraggio sull'effettivo utilizzo dei sottosistemi e dei componenti del rotabile.
- Funzione di analisi statistica: tramite il *database* di flotta è possibile svolgere analisi ingegneristiche finalizzate all'individuazione di azioni di miglioramento tecnico dei rotabili.

I principali vantaggi dell'utilizzo della telediagnostica sono:

- **Riduzione dei guasti bloccanti in linea (riserve):** analisi delle riserve/accudienze accadute in linea prima e dopo l'introduzione del sistema. Naturalmente la riduzione delle riserve è strettamente legata alla capacità di prevenzione che è resa possibile dalla diagnosi automatica ed in tempo reale dei guasti e alla previsione di alcune tipologie

di guasto grazie al rilevamento continuo di alcune grandezze fisiche, parametri di vita o salute di alcuni componenti.

- **Riduzione dei tempi di attraversamento:** analisi della riduzione dei tempi di attraversamento in manutenzione dei veicoli.

### 3 La Manutenzione

Fino agli anni 50' la manutenzione era intesa come una semplice "riparazione" e vista come un male necessario, in quanto era legata essenzialmente ai guasti e veniva lasciata alla competenza dei tecnici di manutenzione.

Negli ultimi quaranta anni c'è stata una forte crescita degli impianti industriali che ha inciso fortemente sull'economia mondiale, per questo motivo le imprese hanno dovuto affrontare temi di mercato molto complessi. Per affrontare questi ultimi hanno dovuto proporre innovazioni tecnologiche e di affidabilità.

Molte cose sono cambiate da quando, nel 1963, l'OCSE, acronimo di Organizzazione per la Cooperazione e lo Sviluppo Economico, diede una definizione originale di manutenzione. Infatti fino alla metà degli anni 80' sono state formulate molte e nuove teorie, alcune delle quali non ancora completamente applicate.

Nel corso degli anni la scienza manutentiva si è trasformata ed è oggi possibile definire con più precisione l'area della manutenzione. Quest'area in apparenza è vastissima, infatti è talmente ampia da non essere chiaro cosa rientri nella manutenzione e cosa no. Questo ha indotto a pensare che non esista un solo tipo di manutenzione, ma differenti tipologia della stessa in relazione al settore di appartenenza: edilizio, manifatturiero, trasporti e servizi, fino ad arrivare ai beni culturali e archeologici.

Osservando la manutenzione attraverso l'azione riparatrice si trovano un'infinità di specializzazioni e qualifiche. In realtà se si prescindono dall'azione riparatrice, che è legata alla tecnologia del sistema su cui viene eseguito l'intervento, i principi della manutenzione sono sempre gli stessi e si articolano tutti allo stesso modo in tutti i settori. L'unica differenziazione che possiamo trovare è nel fabbisogno manutentivo o domanda di manutenzione generati dai sistemi, nella loro longevità e nelle loro caratteristiche intrinseche che determinano poi le strategie manutentive.

La manutenzione così come la qualità è strettamente legata alla progettazione, le cui basi fondanti sono l'analisi affidabilistica e la revisione dei progetti. Un'altra area a cui la manutenzione è molto legata è il progetto della manutenzione ossia i metodi di lavoro, i piani, le politiche, le analisi economiche. Vi è infine l'area del controllo prestazionale del sistema e l'area che è collegata all'organizzazione con i processi e con il sistema informativo attraverso modelli manageriali e strategici.

### 3.1 Definizione e funzione di manutenzione

Oggi la funzione della manutenzione, con la realizzazione di apparecchiature e sistemi sempre più complessi, ha acquisito un'importanza determinante. E' diventata sempre più necessaria e rilevante al fine di evitare, per quanto possibile, l'insorgere dei guasti e cercare eventuali rimedi.

La norma **UNI EN 13306** definisce la manutenzione come *"La combinazione di tutte le azioni tecniche, amministrative e generali, eseguite durante il ciclo di vita di un elemento destinate a preservarlo o a riportarlo in uno stato in cui possa eseguire la funzione richiesta"*.

**L'Associazione Francese di Normalizzazione**, dà un'altra seppur simile definizione di manutenzione: *"L'insieme delle azioni che permettono di mantenere o di ristabilire un bene in uno stato specifico in modo da assicurare un servizio determinato"*.

Al giorno d'oggi la manutenzione in azienda è una funzione strategica a tutti gli effetti, e nelle imprese più grandi e avanzate viene misurata in termini economici. Si deve infatti valutare l'incidenza dei costi di manutenzione sul fatturato di un'azienda e sul valore degli impianti e sistemi utilizzati per la produzione.

Un'oculata gestione della manutenzione permette una riduzione dei costi e un incremento della competitività dell'impresa. Di conseguenza la gestione manutentiva diventa premiante se permette di prendere decisioni e fare scelte di tipo strategico.

La manutenzione si rivela indispensabile per assicurare non solo la disponibilità delle attrezzature, ma anche la sicurezza delle persone, dell'ambiente e dei beni. La **sicurezza** costituisce una componente prioritaria della manutenzione, ed è definita come la capacità di non causare danni a beni, persone e ambiente.

Nel concetto moderno di manutenzione bisogna però tenere conto di altri tre aspetti che sono fondamentali:

- **Affidabilità o Reliability  $R(t)$** : è una funzione probabilistica, ed indica la probabilità che un componente, sistema o macchina sia ancora funzionante al tempo  $t$ , cioè che sia in grado di svolgere la propria funzione, per la quale è stato progettato, senza che si verifichi alcun tipo di guasto. L'affidabilità verrà discussa più nel dettaglio in un successivo capitolo.
- **Disponibilità o Availability  $A$** : Probabilità che un componente o sistema operi in maniera soddisfacente in qualunque istante di tempo.
- **Manutenibilità**: Per manutenibilità si intende l'attitudine alla manutenzione di una data attrezzatura o macchina o anche l'attitudine che

ha la macchina o l'attrezzatura ad essere mantenuta nello stato in cui può svolgere la propria funzione per la quale è stata costruita.

### 3.1.1 Manutenibilità e Disponibilità

Per una definizione più precisa di manutenibilità si fa riferimento alle norme UNI 13306 e UNI 9910 dove viene definita come:

*"L'attitudine di un'entità, in certe condizioni di utilizzo, ad essere mantenuta e ripristinata in uno stato in cui possa eseguire la funzione richiesta, quando la manutenzione è effettuata in date condizioni e sono adottate le procedure e le risorse prescritte".*

La manutenibilità è un concetto strettamente legato alla qualità che, con il supporto della logistica per la manutenzione, insieme all'affidabilità, costituisce la disponibilità del servizio. La manutenibilità deve essere inserita nel prodotto fin dalle sue fasi di progetto poiché è una caratteristica che identifica una proprietà intrinseca del prodotto.

Essa è quindi una disciplina che conta su regole precise, stabilite da norme collaudate ed operative con l'obiettivo principale di ridurre i costi di manutenzione.

L'indicatore principale per misurare la manutenibilità di un'attrezzatura, macchina o componente è il **tempo medio per la riparazione** chiamato anche **MTTR** (*Mean time to repair*) o media dei tempi di riparazione. L'MTTR di un'attrezzatura dipende da alcuni fattori come l'accessibilità, la facilità di individuazione guasto e di montaggio e smontaggio componenti, l'intercambiabilità e l'esistenza di efficienti manuali tecnici. La manutenibilità viene anche definita come la probabilità che l'intervento di manutenzione sia portato a termine entro il tempo  $\mathbf{tr}$ . Pertanto è una funzione di  $\mathbf{tr}$  cioè:  $\mathbf{f(tr)}$ .

Come detto un suo indicatore è il tempo medio di riparazione, quindi è una caratteristica molto importante per i **beni riparabili**, poiché un tempo molto ridotto di riparazione aumenta quella che è la **disponibilità** di quell'attrezzatura.

Anche per la disponibilità è possibile trovare una definizione più precisa grazie alle norme UNI 13306 e UNI 9910, che la definiscono come:

*"L'attitudine di un'entità ad essere in uno stato atto a funzionare come e quando richiesto, in determinate condizioni, partendo dal presupposto che siano fornite le risorse esterne necessarie"*

La disponibilità **A** la possiamo esprimere come:

$$A = \frac{MTTF}{(MTTF + MTTR)} \quad (1)$$

Nella eq (1) a numeratore è presente il termine **MTTF** (*Mean time to failure*), cioè il **tempo medio al guasto**. Il MTTF è un termine che si utilizza per i beni che non sono riparabili e, come detto, rappresenta la media statistica della variabile casuale "tempo di buon funzionamento" o "tempo al guasto" calcolato in un periodo specifico della sua vita.

### 3.1.2 Politiche e tipologie di manutenzione

Esistono varie tipologie di manutenzione e ciascuna di esse è definita da alcune norme. Nessuna di queste tipologie è meglio di altre in assoluto, ma ognuna di esse presenta dei vantaggi e svantaggi. Proprio per questo motivo, per essere in grado di scegliere la tipologia migliore e perseguire quelli che sono gli obiettivi occorre attuare un'analisi valutativa su ogni singolo caso.

Le normative UNI 10147 e UNI 9910 classificano e definiscono le tipologie di manutenzione come segue (vedesi **Figura 13**):



Figura 13: Tipologie di manutenzione

- **Manutenzione Correttiva:** *Manutenzione eseguita a seguito della rilevazione di un'avaria e volta a riportare un'entità.*

E' conosciuta anche come manutenzione a guasto o a rottura, ed è il tipo più basilare fra tutte le tipologie di manutenzione. Questo perché prevede semplicemente di attendere in maniera passiva il presentarsi di un guasto. L'intervento è dunque effettuato a valle di una situazione già compromessa. Pertanto questo tipo di manutenzione risulta essere spesso più costosa, in quanto oltre alla perdita di produzione, dovuta al fermo macchina, si rischiano tempi più lunghi per il ripristino delle funzionalità ( vedesi **Figura 14**).

Questo tipo di manutenzione viene utilizzato quando si agisce su un macchinario o asset a basso costo e tale che un suo malfunzionamento non comprometta il funzionamento di un intero impianto.

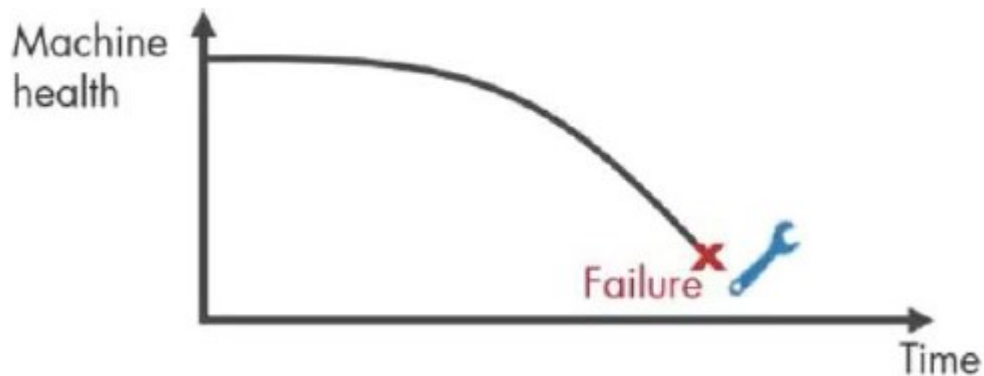


Figura 14: Andamento Manutenzione correttiva

La correttiva, così come tutte gli altri tipi di manutenzione, presenta dei vantaggi e degli svantaggi. I primi sono:

- Contenimento dei costi: con questa tipologia si può generare un risparmio eliminando l'impatto che può avere una manutenzione predittiva eccessiva, a patto che questo tipo di manutenzione sia effettuata su macchinari a basso costo.
- Rafforzamento della produzione quando questa tipologia è opportunamente applicata.

Gli svantaggi invece sono:

- Maggiore esposizione del macchinario o dell'impianto a guasti che possono portare al fermo macchina.

– Riparazioni improvvisate non programmate portano spesso a tempi più lunghi di ripristino del funzionamento dovuti anche al fatto che i ricambi potrebbero non essere presenti in magazzino. Per ovviare a questa problematica il magazzino dovrà necessariamente essere sovradimensionato rispetto all'effettiva necessità di quel componente in modo tale da garantire l'immediatezza dell'intervento. Anche l'allocazione del personale può risultare un problema che causerebbe un ulteriore ritardo.

- **Manutenzione migliorativa:** Definita dall'UNI 10147 come "*Insieme delle azioni di miglioramento o piccola modifica che non incrementano il valore patrimoniale del bene*".

Questa tipologia di manutenzione è una strategia che si pone come obiettivo quello di eliminare o ridurre i fermi macchina e tutti i rischi ad essi connessi. Tale intervento riguarda quindi anche la sicurezza stessa. Gli interventi di questo tipo sono infatti, al contrario degli interventi di manutenzione preventiva, finalizzati ad ottenere un miglioramento delle prestazioni di un macchinario o impianto.

Pertanto, questa tipologia di manutenzione, non essendo legata a guasti o avarie, non ricade nella manutenzione correttiva o nella predittiva ma è a se stante.

- **Manutenzione preventiva:** Definita dall'UNI 13306 come "*Manutenzione eseguita, destinata a valutare e/o mitigare il degrado e a ridurre la probabilità di guasto di un'entità*".

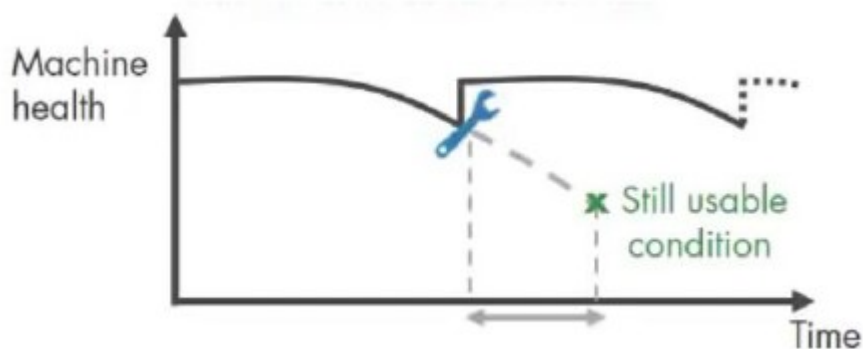


Figura 15: Andamento Manutenzione preventiva

Questa tipologia di manutenzione prevede una serie di attività che mirano a rallentare il processo di degradazione e usura di un sistema o



un suo componente (vedesi **Figura 15**). Per riuscire a godere a pieno dei suoi vantaggi bisogna individuare il giusto compromesso tra questo tipo di manutenzione e le altre tipologie che, al contrario, attendono il verificarsi di un guasto prima di un eventuale intervento.

La manutenzione preventiva porta con sé una serie di vantaggi soprattutto in relazione alla correttiva. Oltre alla già citate riduzione dei fermi macchina e estensione di vita degli impianti o macchinari, con questa politica si ottiene un miglioramento della sicurezza, una riduzione degli infortuni, una riduzione dei costi degli interventi di manutenzione correttiva (che, come detto, possono essere costosi per molti motivi) e una riduzione dei tempi di lavoro dovuta alla preparazione esecutiva degli operatori.

Grazie alle previsioni di intervento si può quantificare in maniera razionale gli approvvigionamenti dei materiali di ricambio senza la necessità di sovradimensionare le scorte a magazzino. Tutto questo porta ad un miglioramento dei margini di profitto e delle performance produttive.

Naturalmente questo genere di manutenzione porta con sé anche degli svantaggi: la sostituzione di un componente in base al raggiungimento di scadenze temporali o a un preciso numero di utilizzo, significa che con molta probabilità lo avremmo potuto utilizzare ancora per qualche chilometro o ciclo di utilizzo senza incorrere a una rottura. Un altro svantaggio è il costo di questa manutenzione che può essere molto elevato se si effettuano troppi interventi con una cadenza eccessiva, senza contare anche il costo in termini di tempo utilizzato per programmare gli interventi.

La manutenzione preventiva a sua volta si può suddividere in **manutenzione programmata**, **manutenzione su condizione** e **manutenzione predittiva**.

- **Manutenzione Programmata o Ciclica:** Definita dall'UNI 13306 come *"manutenzione preventiva effettuata in conformità a intervalli di tempo stabiliti o a numero di unità di misura di utilizzo, ma senza una precedente indagine sulle condizioni dell'entità"*. La programmata o ciclica è il tipo più semplice di manutenzione preventiva. Infatti la sostituzione, che viene effettuata senza conoscere lo stato del componente o del macchinario, si basa su modelli statistici ricavati dal monitoraggio temporale sul campo durante il funzionamento. Si avrà sicuramente un aumento dell'affidabilità sacrificando però parte della vita utile del componente e quindi del macchinario o impianto.

A sua volta la manutenzione programmata o ciclica si suddivide in:

- **Manutenzione ciclica a data costante**
- **Manutenzione ciclica a età costante**

La prima prevede l'intervento manutentivo o una sostituzione di un componente a intervalli regolari di tempo. Questi ultimi hanno un tempo che è fissato indipendentemente da ciò che accade al suo interno, quindi anche se si verificano guasti durante l'intervallo, alla fine di quest'ultimo il componente dovrà comunque essere sostituito (vedesi **Figura 16**).

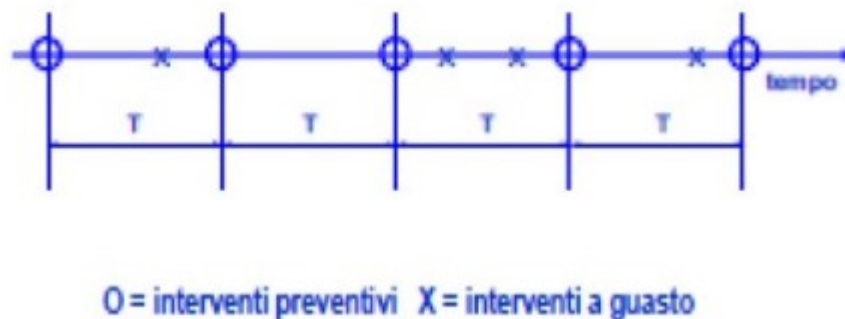


Figura 16: Programmazione a data costante

La seconda prevede invece, a differenza della data costante, un intervento manutentivo dopo un tempo operativo che rimane costante indipendentemente dagli interventi correttivi effettuati in precedenza, quindi il tempo viene rimisurato da zero ogni volta che il componente viene sostituito (vedesi **Figura 17**).

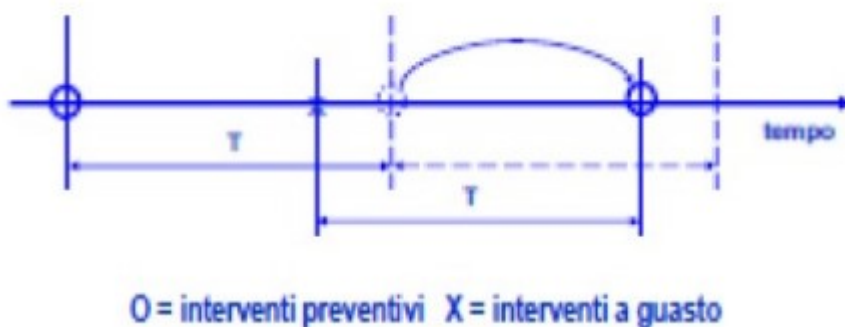


Figura 17: Programmazione a età costante

Entrambi i tipi di manutenzione devono avere alla base la conoscenza dell'affidabilità del componente per poter così calcolare il tempo dell'intervento.

I vantaggi sono quelli già citati per la manutenzione preventiva. Gli svantaggi invece sono il dover sacrificare parte della vita utile del componente, il fatto che è un metodo applicabile solo nel caso di invecchiamento del componente e che quindi non è un metodo intuitivo, infatti ha bisogno di modelli basati sui dati storici dei guasti.

- **Manutenzione su condizione:** Definita dalla norma UNI 13306 come *"manutenzione preventiva che comprende la valutazione delle condizioni fisiche, l'analisi e le possibili azioni di manutenzione conseguenti"*.

A differenza degli altri tipi di manutenzione preventiva e programmata, questa politica cerca di porre rimedio ad uno degli svantaggi che possono derivare da un eccessivo uso di prevenzione. Infatti, come detto in precedenza, per prevenire il fermo macchina o un guasto si procede sempre con la sostituzione di componenti che non sono ancora arrivati a fine vita. La manutenzione su condizione cerca di ridurre questa inefficienza tramite il monitoraggio del macchinario, per capire se è il momento di intervenire oppure no. Per monitorare lo stato del macchinario si possono utilizzare diversi criteri o analisi:

- Analisi delle vibrazioni: si effettua di solito su componenti o organi rotanti come ingranaggi, boccole, alberi di trasmissione ecc. . .
- Analisi di usura: si cercano delle particolari forme di usura dovute al non corretto funzionamento del componente o macchinario.
- Analisi di temperatura: il degrado di un componente può essere visto anche in base ad un aumento della temperatura durante il suo funzionamento a regime.
- Analisi acustica: un nuovo rumore, l'aumentare o il variare di un rumore già presente potrebbe indicare il degrado di un componente e a breve la sua rottura o il malfunzionamento di un macchinario.

Questa è sicuramente una strategia vincente per ridurre il numero di fermi macchina cercando di eliminarli definitivamente. Con questo metodo si evita anche di sostituire componenti che potrebbero avere ancora parte della loro vita utile, cioè ci consente di effettuare la manutenzione nel momento migliore. Naturalmente con il diminuire dei possibili guasti aumenta anche la sicurezza. Si hanno però anche in questo caso

degli svantaggi, come la necessità di avere personale addetto alla manutenzione ben addestrato, e la necessità di un investimento iniziale per acquistare le attrezzature indispensabili per monitorare lo stato del macchinario.

- **Manutenzione Predittiva:** Definita dalla norma UNI 13306 come "*manutenzione eseguita in seguito a una previsione derivata dall'analisi ripetuta o da caratteristiche note e dalle valutazioni dei parametri significativi afferenti il degrado dell'entità*".

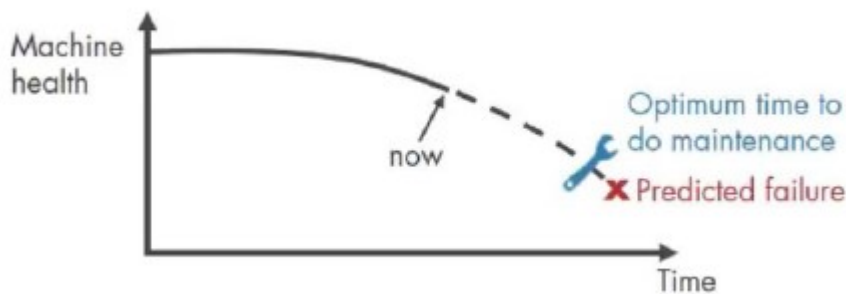


Figura 18: Andamento manutenzione predittiva

E' un particolare tipo di manutenzione preventiva, essa consiste nel continuo monitoraggio delle condizioni di un macchinario o un impianto attraverso l'utilizzo di molti e particolari sensori. Questi ultimi forniscono dati e segnali in tempo reale che, processati attraverso modelli matematici appositamente sviluppati, possono predire quando l'impianto o macchinario avrà bisogno di un intervento manutentivo con l'obiettivo di ridurre al minimo i guasti inaspettati e il fermo macchina (vedesi **Figura 18**)

Utilizzare modelli di analisi predittiva è utile per scongiurare il rischio di un'eccessiva prevenzione, che può portare a molti fermi macchina non necessari o al rischio di non eseguirne abbastanza. Con questo metodo le azioni manutentive sono fatte nel momento più opportuno.

Le aziende moderne hanno iniziato ad utilizzare strumenti di manutenzione predittiva intorno all'inizio del XXI secolo, andando via via a sostituire i precedenti tipi di manutenzione che non erano più ritenuti idonei, convenienti ed efficienti.

Oggi, attraverso un approccio online e tecnologie IoT (*Internet of Things*), le condizioni degli impianti e dei macchinari possono essere monitorate

costantemente in remoto, sfruttando la connessione tra sensori IoT e i *software* utilizzati nelle aziende per la gestione degli impianti.

Si può notare una certa somiglianza tra la manutenzione su condizione e la manutenzione predittiva, entrambe infatti cercano di eliminare le inefficienze dovute ad un'eccessiva prevenzione. Si basano entrambe sul monitoraggio di un impianto, ma ci sono delle differenze. Una prima differenziazione riguarda l'utilizzo delle tecnologie applicate.

L'analisi predittiva infatti si serve di tecnologie come *big data*, *machine learning*, Intelligenza Artificiale (IA), reti neurali e tecnologie estremamente avanzate in grado di avvicinare l'azienda o l'impresa che le utilizza verso l'Industria 4.0.

I criteri utilizzati per monitorare i componenti, gli impianti e i macchinari sono gli stessi elencati in precedenza per la manutenzione su condizione, ma vengono selezionati anche in base alla tipologia di sensore che si decide di installare.

Come si può ben comprendere, una politica di questo tipo è in grado di migliorare la qualità delle attività manutentive di un'azienda, limitando il numero di fermi macchina e i loro tempi andando ad ottimizzare l'allocazione delle risorse. Alcuni fra i più importanti vantaggi che si possono ottenere sono l'incremento del ciclo di vita degli impianti e dei macchinari, l'ottimizzazione dei costi: quest'ultima è possibile attraverso la riduzione del lavoro e delle attrezzature che si utilizzano nonché del capitale immobilizzato a causa del mantenimento di un magazzino ricambi troppo fornito. Per ultimo, ma non per importanza, un aumento della sicurezza dei lavoratori nel processo di produzione.

Tutti questi vantaggi si trasformano poi in un aumento della produttività che viene considerata un punto cardine per rimanere competitivi sul mercato a livello internazionale.

Si hanno ovviamente anche degli svantaggi, come ad esempio un'eccessiva complessità di questo metodo che lo rende non proprio accessibile a tutte le realtà aziendali oltre all'investimento elevato per l'acquisto di sensori.

### **3.1.3 Scelta della politica di manutenzione**

Come è facile capire, non esiste una tipologia di manutenzione migliore rispetto alle altre, ma ci sono metodologie che ci consentono di individuare e scegliere quale sia il metodo più giusto in base agli obiettivi aziendali che sono stati fissati. Un motivo di scelta di una tipologia piuttosto che un'altra



Figura 19: Schema decisionale

potrebbe essere la tecnologia da impiegare, oppure potrebbe anche essere un motivo economico.

Innanzitutto bisogna capire quale sia l'impianto, il macchinario o componente che si vuole mantenere. Subito dopo l'acquisto di un macchinario è molto importante raccogliere dei dati come la frequenza del guasto e la gravità dello stesso, dopodiché in base a questi dati decidere quale metodologia applicare (vedesi **Figura 19**).

La criticità è misurabile come:

$$Criticita = Frequenza * Gravita \quad (2)$$

dove all'aumentare della criticità si utilizzano politiche manutentive che sono sempre più costose, si riesce quindi a vedere che si passa da manutenzioni correttive che di per sé sono poco costose (ma eccessivi interventi correttivi portano ad un aumentare dei costi di manutenzione per eccessivi fermi macchina) a politiche sempre più costose.

Questo metodo è utile dandoci una scala di priorità, dove, qualora ci trovassimo davanti ad interventi di gravità minore che accadono sporadicamente, sarebbe meglio utilizzare una politica correttiva; se invece avessimo una gravità media con un'elevata frequenza allora sarebbe meglio applicare una manutenzione su condizione o predittiva. In ultimo se avessimo un'elevata frequenza di guasto con un'elevata criticità, sarebbe allora sicuramente meglio optare per una manutenzione migliorativa.

## 3.2 Manutenzione dei rotabili

Negli ultimi anni si è reso necessario sviluppare piani dettagliati di manutenzione con lo scopo di prolungare, dato l'elevato costo e il lungo periodo di ammortamento, la vita dei rotabili cercando di mantenere allo stesso tempo un alto livello di prestazione, andando a ridurre il più possibile il numero dei guasti e cercando di avere un'alta regolarità di servizio andando infine a garantire maggiore sicurezza.

Quanto viene eseguito nelle officine, come visto nel paragrafo precedente, è di applicare una politica di manutenzione correttiva a seguito di un guasto improvviso o una politica di manutenzione programmata per cercare di prevenire un eventuale guasto. Nell'impianto di Ancona queste due tipologie di manutenzione hanno una denominazione differente, infatti vengono nominate manutenzione corrente e manutenzione ciclica. Entrambe vengono effettuate durante il ciclo di vita, con il solito obiettivo di mantenere l'integrità originaria, di far fronte al degrado e cercare di allungare la vita utile del rotabile.

Le possiamo specificare meglio come segue:

- **Manutenzione corrente** detta anche **manutenzione di primo livello**: questa comprende sia le manutenzioni per guasti improvvisi, sia le manutenzioni programmate che vengono effettuate a scadenze chilometriche (CO, VI, RT ecc...) o periodiche.
- **Manutenzione ciclica** detta anche **manutenzione di secondo livello**: comprende tutti quegli interventi periodici effettuati a scadenze chilometriche o periodiche definite dal piano di manutenzione. Queste rispetto alle prime sono molto più complesse e invasive in quanto richiedono tempi molto più lunghi rispetto agli interventi di primo livello.

Tutte le scadenze, periodiche e chilometriche, sono elencate nel **piano di manutenzione**, redatto dal costruttore. Nel suddetto manuale troviamo quindi specificate le scadenze con tutti i componenti da sostituire. Tutte le attività che sono scritte nel Piano di manutenzione sono classificate in:

- **S:Sicurezza** riguardano tutti gli organi di sicurezza
- **C:Comfort**
- **R: Regolarità di servizio**

Le modalità di sostituzione di questi componenti vengono invece specificate nelle **liste operazioni** redatte da Trenitalia S.p.A. .

### 3.2.1 RSMS, Avvisi e Ordini

L'RSMS-Rolling Stock Management System è un sistema informativo aziendale utilizzato da Trenitalia S.p.A. per la gestione di tutte le attività legate alla manutenzione del materiale rotabile. Il sistema si interfaccia con il mondo di esercizio e dà supporto a tutte le fasi del processo manutentivo nel rispetto delle diverse competenze.

Gli interventi da effettuare, sia che siano correttivi o programmati, sono effettuati e gestiti sulla base di **avvisi** di manutenzione. Questi ultimi possono essere generati da fonti diverse, ma il loro scopo rimane sempre quello di segnalare la necessità di un intervento. Possiamo distinguerli in:

- **ZA**: sono avvisi manutentivi generati dal personale di bordo (capotreno o macchinista) durante il servizio;
- **ZB**: sono avvisi manutentivi emessi dal personale di officina oppure, compatibilmente con le norme di esercizio, possono essere degli avvisi **ZA** che vengono rinviati.
- **ZC**: sono avvisi di interventi programmati, presenti nel Piano di manutenzione, con scadenze chilometriche o temporali. Questo tipo di avviso è emesso direttamente dal sistema RSMS.
- **ZD**: questo tipo di avviso è emesso dal sistema di telediagnostica, presente sui veicoli, a seguito di un rilevamento di un'anomalia.
- **ZS**: sono avvisi emessi in seguito a verifiche e/o modifiche del veicolo;
- **ZN**: sono avvisi di cannibalizzazione di un materiale rotabile da cui si sottraggono componenti a mezzi già fermi per installarli su altri.

Gli avvisi non vengono però lavorati singolarmente, ma vengono predisposti appositi ordini di manutenzione. In base al tipo di avviso, gli ordini possono riferirsi ad interventi di tipo programmato o correttivo e prendono il nome di **ordini di lavoro Odl**.

Gli **OdL-Ordini di Lavoro** sono quindi generati dall'impianto e rappresentano l'intervento della manutenzione su una serie di avvisi.

Gli OdL per motivi organizzativi, relativamente alla partizione del lavoro, possono essere articolati in un ordine principale, detto anche **ordine padre** e in ordini secondari ad esso collegati detti **ordini figli**.



## 4 Teorie e concetti sull'affidabilità

**L'affidabilità** o **Reliability** è un termine che viene usato in campo tecnico-scientifico per rappresentare la probabilità che un dispositivo, un componente, un macchinario o un impianto sia in grado di svolgere una specifica funzione per la quale è stato progettato.

La norma **UNI 13306** ci dà una definizione più precisa di affidabilità definendola come "*L'attitudine di un'entità a svolgere una funzione richiesta in date condizioni durante un intervallo di tempo stabilito*".

Inizialmente quest'attitudine era considerata un fattore più qualitativo che quantitativo. Ciononostante, negli ultimi anni, a causa di cambiamenti significativi e di una serie di circostanze, ad esempio la pressione economica, oppure l'introduzione sul mercato di nuovi materiali o, infine, la necessità di assicurare un alto livello di sicurezza nel momento in cui si verifica un guasto di una determinata apparecchiatura o di un impianto (aereo, impianti nucleari ecc. . . ), si è venuta a creare la necessità di richiedere che l'attitudine sia misurata solo dal punto di vista quantitativo.

E' nata quindi l'esigenza di indagare sulle modalità di guasto di un componente durante la sua funzione e capire il motivo di questo guasto.

### 4.1 Definizione e tipologie di guasto

Quando un componente si comporta in modo tale da non esplicare la propria funzione entro limiti stabiliti, allora l'elemento è da considerarsi guasto. La norma **UNI 13306** definisce il termine guasto come "*cessione dell'attitudine di un'entità ad eseguire la funzione richiesta*".

La modalità con cui l'elemento o il componente si guasta è detta **modalità o criterio di guasto**. Le modalità di guasto per ogni macchinario o impianto possono essere molte, ma ognuna di esse ha una certa probabilità di manifestarsi. Possiamo classificare i criteri di un guasto in **criterio per entità**, **criterio per impatto** e **criterio per vita utile del componente**.

- **Criterio per entità**

Un dispositivo risulta guasto anche quando non esegue correttamente la sua funzione per la quale è stato progettato, secondo questo criterio possiamo suddividere i guasti in:

- Guasti parziali: determinano una variazione delle prestazioni del componente o dispositivo non compromettendo però il suo funzionamento. Si ha quindi una perdita di prestazione dovuta al degrado.

- Guasti totali: si ha un'interruzione del funzionamento dovuta a una variazione delle prestazioni del componente.
- Guasti intermittenti: si ha un periodo casuale di interruzione di funzionamento dovuto a casuali periodi in cui il componente non esercita la propria funzione.

- **Criterio per impatto**

La condizione di guasto si riferisce solo al componente o all'elemento preso in esame, il guasto del componente può anche non causare il malfunzionamento dell'intero sistema compromettendo anche la sua affidabilità.

- Guasti di primaria importanza: sono guasti riferiti a un componente di cui ne riducono l'affidabilità insieme a quella dell'intero sistema di cui fa parte.
- Guasti di secondaria importanza: sono guasti riferiti a un componente che non riducono però l'affidabilità dell'intero sistema di cui fa parte.
- Guasti critici: sono guasti molto più gravi di quelli di primaria importanza e riducono l'affidabilità e la funzionalità dell'intero sistema di cui fa parte il componente.

- **Criterio di vita**

Questo criterio di classificazione dei guasti è molto importante e li suddivide in base al periodo di vita del componente; possiamo individuare tre tipologie di guasto con questo criterio.

- Guasti infantili o precoci: sono guasti che avvengono durante il primo periodo di vita del componente detto anche periodo di rodaggio o mortalità infantile. Questi guasti sono difetti intrinseci dei componenti che non sono emersi durante i collaudi. La probabilità che questi si verifichino decresce gradualmente nel tempo, in genere si verificano da poche ore di funzionamento fino alle prime centinaia di ore. Questo tipo di guasto può essere ridotto, ma non portato a zero, con un adeguato sistema di controllo della qualità.
- Guasti casuali: sono guasti che avvengono durante il periodo di "vita utile" del componente, durante il quale la probabilità che il componente si guasti è totalmente indipendente dal tempo. Questo tipo di guasto è dovuto a fattori incontrollabili e nemmeno una buona progettazione può eliminarne la probabilità di accadimento.

- Guasti per usura: sono guasti che avvengono durante il periodo di "invecchiamento", durante quest'ultimo il rateo di guasto è crescente in seguito a processi di deterioramento e usura. La degradazione è irreversibile e può essere ridotta con un'opportuna strategia di manutenzione.

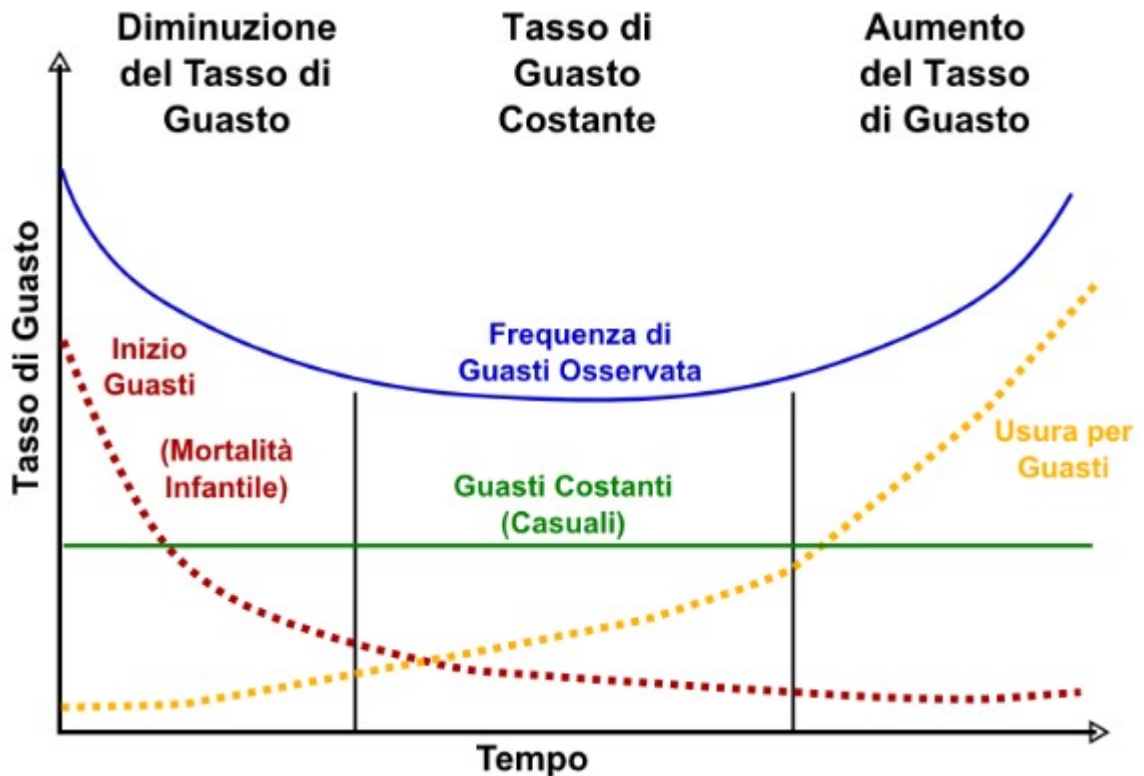


Figura 20: Andamento del tasso di guasto nel tempo

Ogni periodo di vita del componente ha quindi il proprio andamento del tasso di guasto, decrescente per la mortalità infantile, costante per il periodo di vita utile e crescente per il periodo di usura. Sommando le tre curve ne risulta una curva detta *bathtub* (curva a vasca da bagno) (vedesi **Figura 20**).

I componenti in genere vengono utilizzati solo nel periodo di vita utile o per intervalli di tempo durante il quale il loro tasso di guasto è costante, anche se questi tre periodi non sono nettamente definiti.

Come è possibile immaginare, una curva del genere costituita da tre "zone" non è facile da analizzare o di tenerne traccia attraverso un modello matematico che interpreti completamente il fenomeno.

Infatti i problemi di affidabilità vengono spesso affrontati con una distribuzione esponenziale durante il periodo di vita utile. E' possibile però, come vedremo nei paragrafi a seguire, utilizzare la **distribuzione di Weibull** per affrontare problemi di affidabilità su tutta la curva a vasca.

## 4.2 Affidabilità e inaffidabilità

Come già affrontato nell'introduzione del capitolo, l'affidabilità è stata definita come la probabilità che il componente al tempo  $t$  stia svolgendo la sua funzione per il quale è stato progettato. In questo paragrafo daremo una rappresentazione matematica di affidabilità.

Consideriamo un campione di  $N$  componenti identici. Supponiamo che all'istante  $t$  siano sopravvissuti  $Nv$  componenti e si siano guastati  $Ng$  componenti, allora possiamo scrivere che (3):

$$N = Ng(t) + Nv(t) \quad (3)$$

Il concetto di affidabilità non può mai prescindere dall'istante di tempo che si sta considerando e dipende appunto da esso. Definiamo l'affidabilità del componente al tempo  $t$  come:

$$R(t) = \frac{Nv(t)}{N} \quad (4)$$

cioè come rapporto tra i componenti ancora funzionanti al tempo  $t$  e il numero totale di componenti (4), poiché l'affidabilità è in complemento a uno con l'inaffidabilità, possiamo definire quest'ultima come:

$$F(t) = 1 - R(t) = 1 - \frac{Nv(t)}{N} = \frac{Ng(t)}{N} \quad (5)$$

cioè come rapporto tra gli elementi guasti al tempo  $t$  e il totale degli elementi del campione (5).

Affidabilità e inaffidabilità sono quindi due funzioni di probabilità e assumono pertanto valori nell'intervallo da 0 a 1. Naturalmente più è grande il campione più sarà precisa la stima dell'affidabilità e dell'inaffidabilità.

La **funzione di densità della probabilità di guasto**  $f(t)$  rappresenta la probabilità che una certa variabile aleatoria, il tempo di rottura  $T$  in questo caso, sia compresa nell'intervallo di tempo  $(t, t+dt)$  (6):

$$f(t) = P(t < T \leq t + dt), t \geq 0 \quad (6)$$

La probabilità che il componente si guasti entro il tempo  $t$  (7) sarà quindi:

$$F(t) = P(T \leq t) = \int_0^t f(t)dt \quad (7)$$

che è proprio la funzione di **inaffidabilità**.

Poiché l'affidabilità e l'inaffidabilità sono in complemento a uno allora la probabilità che il componente ancora funzioni dopo un certo tempo  $t$  sarà:

$$R(t) = P(T \geq t) = \int_t^{\infty} f(t)dt \quad (8)$$

otteniamo quindi la funzione di affidabilità (8).

Mettendo le due relazioni in un grafico si ottiene (vedesi **Figura 21**):

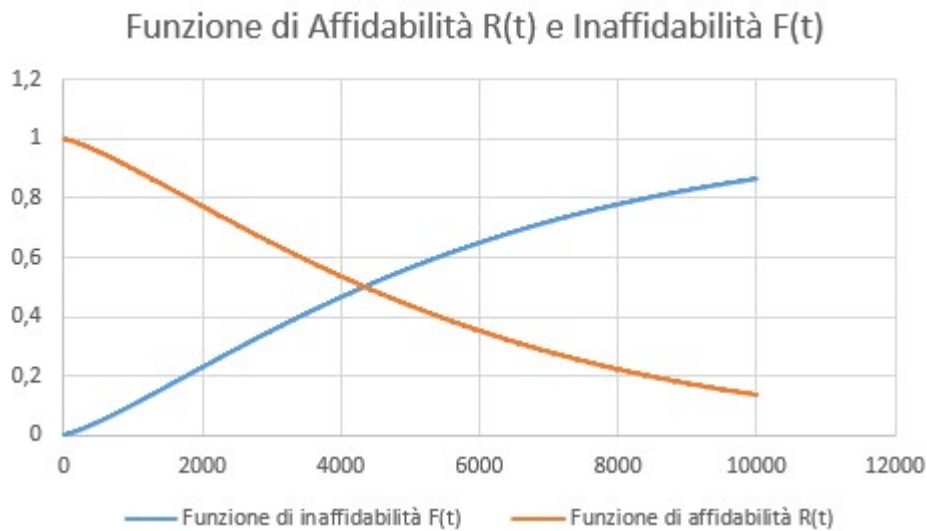


Figura 21: Grafico affidabilità e inaffidabilità

Si può inoltre scrivere che:

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = -\frac{dR(t)}{dt} \quad (9)$$

Un altro parametro molto importante è il **tasso di guasto**  $\lambda(t)$ , definito come la propensione al guasto di un componente fino all'istante di tempo  $t$ . Viene anche detto come il numero di componenti che si è guastato nell'unità di tempo, riferito però al numero di componenti ancora funzionanti in quell'istante:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{f(t)}{1 - F(t)} \quad (10)$$

È inoltre importante ricavare l'affidabilità  $R(t)$  e l'inaffidabilità  $F(t)$  in funzione del tasso di guasto  $\lambda$ , prendendo la (10) e sostituendo al suo interno la (9) e la (5) si ottiene:

$$\lambda(t)dt = -\frac{dR(t)}{R(t)} \quad (11)$$

e integrando la (11) da 0 a  $t$  si ottiene:

$$\int_0^t \lambda(t)dt = -\int_0^t \frac{dR(t)}{R(t)} = [\ln(R(t)) - \ln(R(0))] = -\ln[R(t)] \quad (12)$$

elevando tutti i membri a esponente si ottiene l'affidabilità  $R(t)$  in funzione del tasso di guasto:

$$R(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t)dt} \quad (13)$$

Dalla (13) si possono ottenere altre relazioni utili:

$$F(t) = 1 - e^{-\int_0^t \lambda(t)dt} \quad (14)$$

$$f(t) = \lambda(t) * e^{-\int_0^t \lambda(t)dt} \quad (15)$$

cioè rispettivamente (14) l'inaffidabilità in funzione del tasso di guasto e (15) la funzione di densità di probabilità, anche essa in funzione del tasso di guasto.

È molto importante quindi conoscere il tasso di guasto perché consente di ricavare tutte le altre grandezze di tipo affidabilistico. Un'ultima grandezza da considerare rilevante è il **MTTF-Mean Time To Failure** che è ricavata in funzione della densità di probabilità (15):

$$MTTF = \int_0^{\infty} t * f(t)dt = \int_0^{\infty} R(t)dt \quad (16)$$

### 4.3 Modelli di affidabilità

Come già appurato, dalla conoscenza del tasso di guasto  $\lambda(t)$  è possibile calcolare una serie di relazioni che ci consentono di studiare l'affidabilità di un componente. Tutte le relazioni ricavate sono valide dal punto di vista teorico, ma dal punto di vista pratico non è sempre possibile calcolare l'affidabilità in forma analitica. Per questo motivo si utilizzano dei modelli matematici che cercano, per quanto possibile, di descrivere il comportamento reale dei componenti o dei sistemi di cui si conoscono i dati grazie a prove

di laboratorio o raccolte durante l'esercizio. Si utilizza quindi il modello che meglio rappresenta l'andamento del tasso di guasto nella fase di vita in cui il componente si trova. Il modello più spesso utilizzato è l'**esponenziale negativo**, in questo studio è stato utilizzato il modello di **Weibull**. Nei paragrafi successivi verranno descritte ed evidenziate le differenze.

#### 4.3.1 Modello esponenziale negativo

Il modello esponenziale negativo è il più utilizzato e, proprio per questo, esso riveste un ruolo molto importante per lo studio dell'affidabilità di un sistema o di un componente.

Questo tipo di modello rappresenta molto bene l'andamento del tasso di guasto durante la vita utile del componente, cioè nella zona centrale della curva a vasca da bagno (vedesi **Figura 22**).

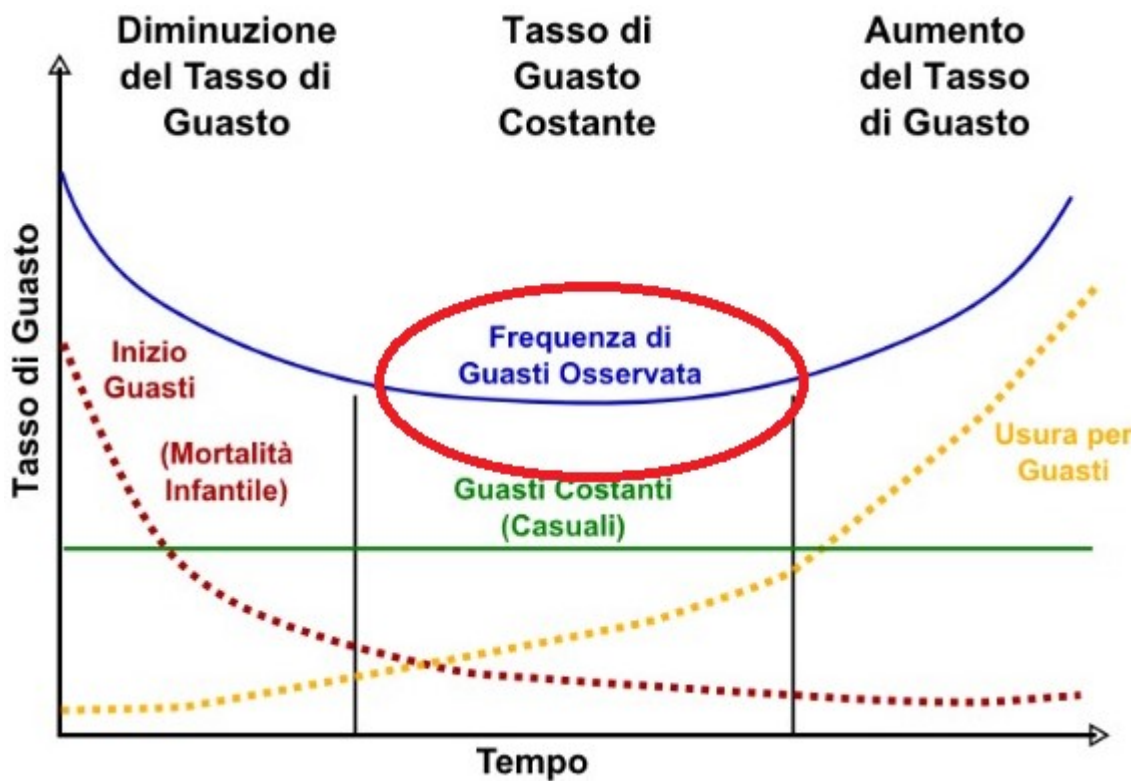


Figura 22: Zona centrale della curva

In quella zona, infatti, è possibile considerare il tasso di guasto  $\lambda(t)$  pressoché costante. Questa condizione è una caratteristica unica della distribuzione esponenziale negativa, da cui si ottengono le seguenti relazioni:

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (17)$$

$$F(t) = 1 - R(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (18)$$

$$f(t) = -\frac{dR(t)}{dt} = \lambda e^{-\lambda t} \quad (19)$$

$$MTTF = \int_0^{\infty} R(t) dt = \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda} \quad (20)$$

Come è possibile vedere dalla (20) il *Mean Time To Failure*, nel modello esponenziale negativo, è il reciproco del tasso di guasto.

Avere un tasso di guasto costante implica che non c'è un periodo di tempo in cui la probabilità di guasto è sia maggiore o minore di un altro, ma si ha sempre la stessa probabilità. In queste condizioni il guasto è un evento puramente casuale e questo fenomeno è chiamato *assenza di memoria*, cioè il comportamento del componente e la sua probabilità di guasto non dipendono dalla sua storia precedente.

### 4.3.2 Modello di Weibull

Come visto nel paragrafo precedente, nella distribuzione esponenziale negativa si assume il tasso di guasto costante, ma questa assunzione è spesso troppo restrittiva. Infatti un tasso di guasto sempre costante non permette di descrivere il comportamento di un sistema in modo completo.

Per ovviare a questo problema si può utilizzare la **distribuzione di Weibull**, infatti la forza di questa distribuzione sta nella sua possibilità di rappresentare tutte le fasi di vita del componente.

Questa distribuzione prende il nome dall'ingegnere svedese Wallodi Weibull (1887-1979) che la ideò nel 1937. Fino agli anni 50' le reazioni a questo studio non erano positive, si variava infatti dallo scetticismo fino al rifiuto totale. Qualche anno dopo, Dorian Shainin e Leonard Johnson, due pionieri del campo, migliorarono e applicarono la tecnica.

Anche l'aeronautica americana, dopo il miglioramento da loro apportato, riconobbe il merito di tale tecnica e la finanziò fino al 1975. Ad oggi l'analisi di Weibull è uno dei metodi principali al mondo per studiare l'affidabilità dei componenti qualsiasi sia la sua fase di vita.

Questa distribuzione ha anche un'altra serie di vantaggi in più rispetto a quello già descritto. Infatti con questo metodo si ha la possibilità di ottenere una previsione dei guasti accurata con campioni estremamente piccoli. Questi ultimi consentono di contenere i costi, poiché questi componenti vanno



portati a rottura, e quindi consente di poter testare anche componenti molto costosi.

Un altro vantaggio consiste nel fatto che questa tecnica permette di realizzare grafici semplici, utili e contenti informazioni importanti per l'ingegnere che ne fa utilizzo (vedesi **Figura 23**).

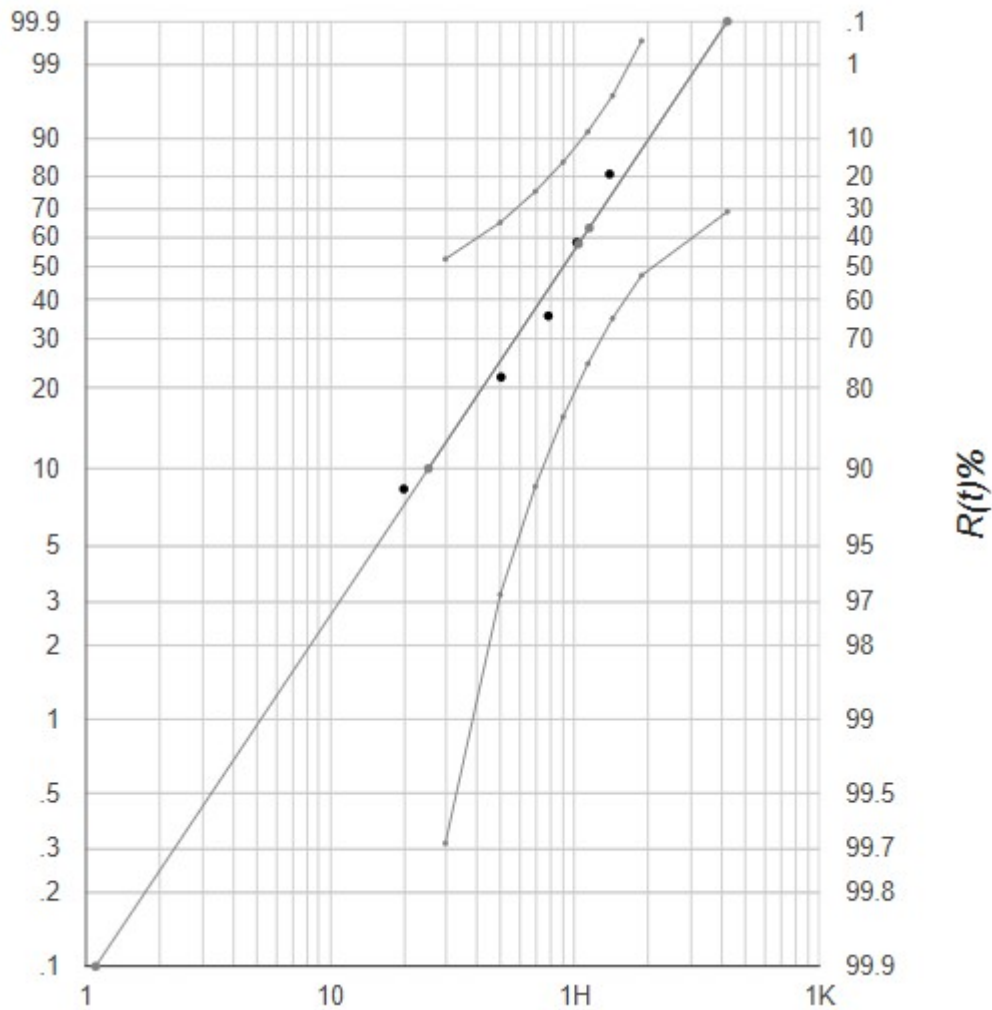


Figura 23: Grafico di Weibull

Nell'asse delle ordinate abbiamo la funzione di inaffidabilità  $F(t)$  (dal basso verso l'alto) e/o la funzione di affidabilità  $R(t)$  (dall'alto verso il basso).

Nell'asse delle ascisse del grafico si ha il tempo di osservazione del componente. È possibile misurare il tempo in modi diversi come la percorrenza chilometrica, i cicli di utilizzo, ecc. . . .

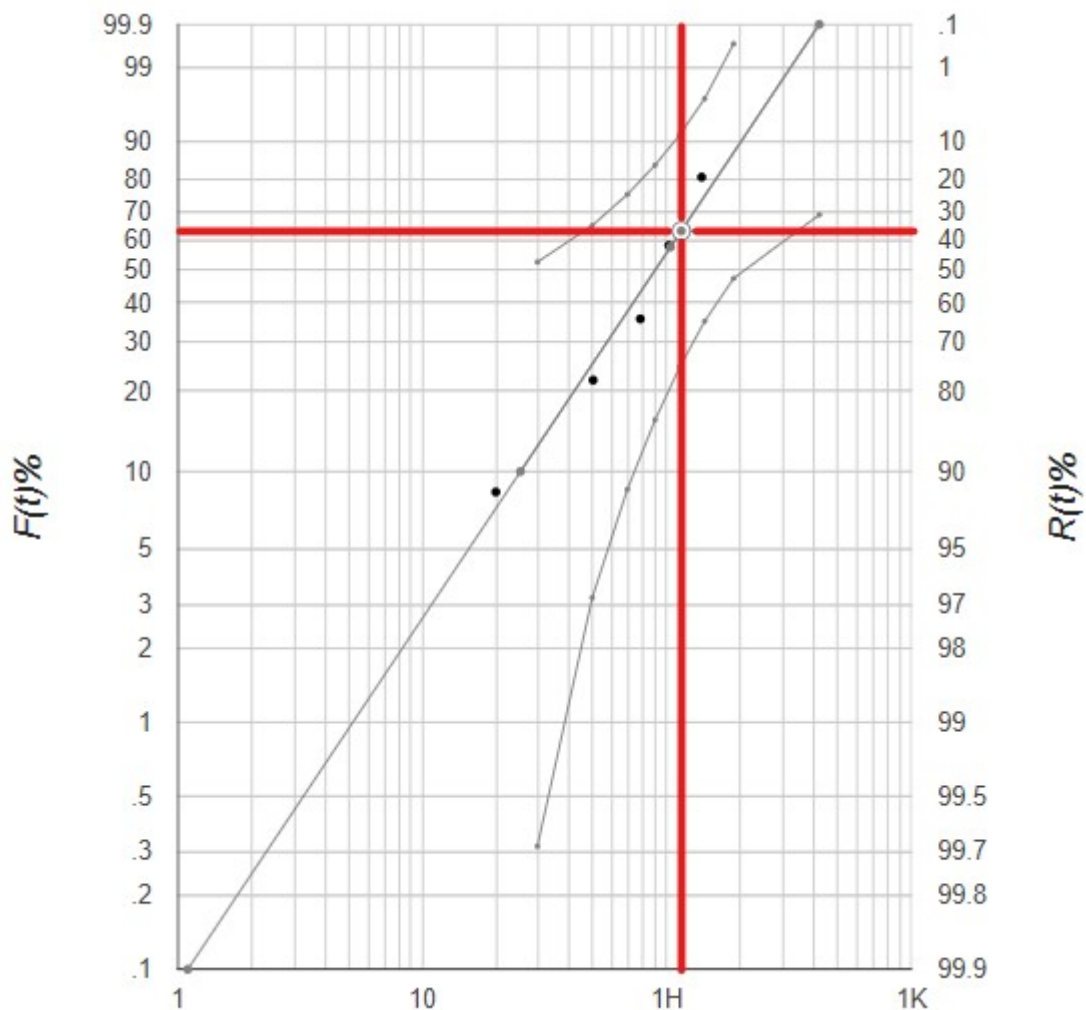


Figura 24: Metodo grafico per trovare  $\eta$

Due parametri molto importanti che si possono ricavare dal grafico sono il **parametro di scala  $\beta$**  e **parametro di vita  $\eta$** .

Il parametro  $\beta$  è ricavabile dal grafico, così come il parametro  $\eta$ , in particolare è il coefficiente angolare della retta, per ricavarlo basta posizionarsi in un punto qualsiasi del grafico, misurare un pollice in direzione orizzontale (verso destra) e poi dalla posizione raggiunta misurare verso l'alto fino ad intersecare la retta. In questo modo, tramite rapporto tra misura verticale e misura orizzontale si ottiene il valore del coefficiente angolare della retta e cioè  $\beta$ .

Per trovare graficamente  $\eta$ , definito anche come l'età in cui il 63.2% dei componenti si romperà, si traccia una retta parallela all'asse delle x a partire

della  $y$  nel punto 63.2 fino ad intersecare la retta. Intersecata la retta si traccia una retta verticale fino ad intersecare l'asse delle  $x$ , il punto che si ottiene e che leggiamo sull'asse  $x$  è il nostro parametro di vita  $\eta$  (vedesi **Figura 24**). La caratteristica di vita  $\eta$  è il tempo di rottura collegato molto strettamente al MTTF. Il parametro di scala  $\beta$ , quindi la pendenza della curva, può fornire indizi sulla fisica del cedimento (vedesi **Figura 25**):

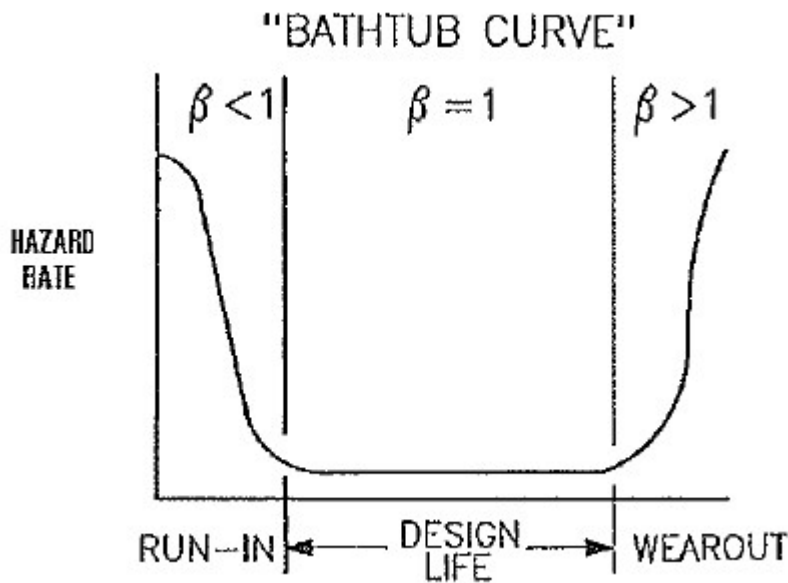


Figura 25: Valori di  $\beta$  nella curva a vasca da bagno

- $\beta < 1$  : Il tasso di guasto ha un andamento decrescente, ci troviamo nella fase della mortalità infantile del componente. Anche la funzione  $f(t)$  ha un andamento decrescente.
- $\beta = 1$ : Il tasso di guasto è costante mentre la funzione  $f(t)$  è ancora decrescente. Si può dire che per questo parametro di forma la distribuzione di Weibull diventa equivalente alla distribuzione esponenziale negativa.
- $\beta > 1$ : Il tasso di guasto in questo caso è crescente, che è rappresentativo del fatto che le rotture avvengono per invecchiamento e usura. La funzione  $f(t)$  invece ha un primo andamento crescente, raggiunge un massimo e poi decresce.

Successivamente è mostrato l'andamento della funzione di densità della probabilità in funzione del valore di  $\beta$  (vedesi **Figura 26**).

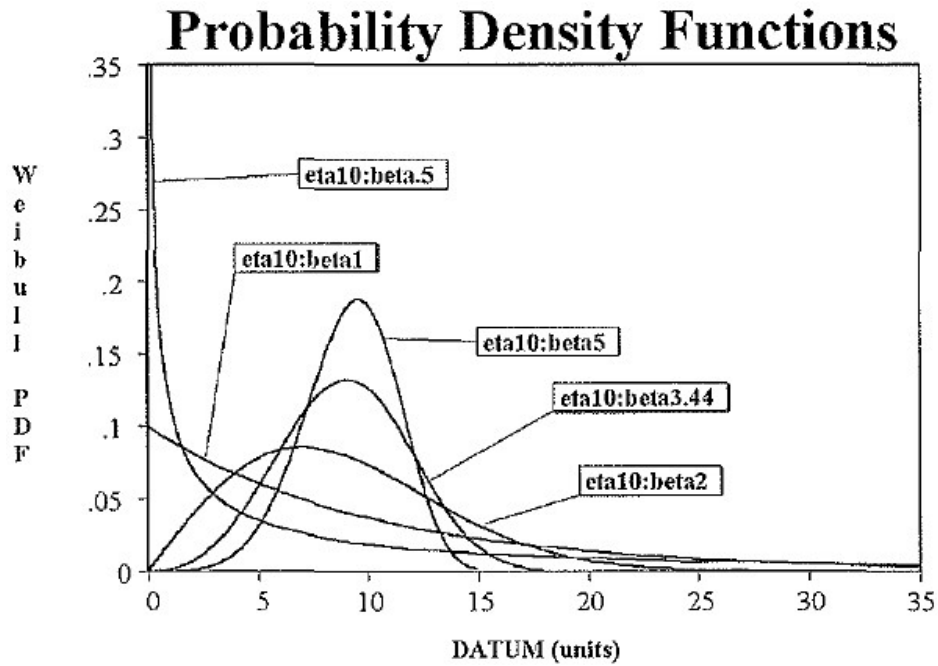


Figura 26: Andamento della densità di probabilità al variare di  $\beta$

Possiamo quindi dire che la variabile aleatoria  $T$  (probabilità di rottura) ha una distribuzione di Weibull con parametri  $\eta > 0$  e  $\beta > 0$  se la funzione densità di probabilità ha la seguente forma (21):

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta^\beta} t^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \quad (21)$$

Le altre relazioni di affidabilità (22), inaffidabilità (23) e tasso di guasto (24) diventano rispettivamente:

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \quad (22)$$

$$F(t) = 1 - R(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \quad (23)$$

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \left(\frac{\beta}{\eta}\right)^\beta t^{\beta-1} \quad (24)$$

Il tasso di guasto (24) con  $\beta=1$  prende la forma di:

$$\lambda(t) = \frac{1}{\eta} \quad (25)$$

che è proprio il tasso di guasto che si ha con la distribuzione esponenziale negativa. Questo risulta essere un ulteriore vantaggio, poiché possiamo vedere la distribuzione esponenziale negativa come un caso particolare della distribuzione di Weibull.

L'analisi di Weibull consiste nel plottare i dati su un grafico e tracciare una retta che approssimi al meglio la distribuzione di punti. Una volta eseguite queste operazioni occorre interpretare il grafico e ricavarne i parametri  $\beta$  e  $\eta$ .

Per poter fare ciò devono essere verificate tre condizioni:

- deve essere definita una data di origine delle prove effettuate;
- deve essere definita la grandezza con la quale si misurerà il tempo (possiamo utilizzare grandezze diverse come i chilometri, i cicli di funzionamento e le ore di funzionamento);
- deve essere definita la modalità di guasto.

Occorre poi trasformare la funzione di probabilità cumulata, o funzione di inaffidabilità, in una forma logaritmica in modo tale da ottenere, come grafico in funzione del tempo, una retta. Tale retta deve cercare il più possibile di approssimare al meglio la distribuzione dei punti.

Poiché la funzione di inaffidabilità per la distribuzione di Weibull ha questa forma:

$$F(t) = 1 - e^{-(\frac{t}{\eta})^\beta} \quad (26)$$

applicando il logaritmo naturale alla (26) si ottiene:

$$\ln(1 - F(t)) = -(\frac{t}{\eta})^\beta \quad (27)$$

$$-\ln(1 - F(t)) = (\frac{t}{\eta})^\beta = \ln(\frac{1}{1 - F(t)}) = (\frac{t}{\eta})^\beta \quad (28)$$

Applicando nuovamente il logaritmo naturale alla (28):

$$\ln(\ln(\frac{1}{1 - F(t)})) = \beta \ln(\frac{t}{\eta}) \quad (29)$$

$$\ln(\ln(\frac{1}{1 - F(t)})) = \beta \ln(t) - \beta \ln(\eta) \quad (30)$$

La relazione (30) è associabile a una retta  $y = mx + q$  dove:

- la  $y = \ln(\ln(\frac{1}{(1-F(t))}))$
- il coefficiente angolare  $m$  della retta non è altro che  $\beta$
- la  $x$  è  $\ln(t)$
- mentre il termine noto  $q$  è  $\beta \ln(\eta)$ . È proprio dal termine noto che si andrà ad estrarre la **caratteristica di vita** o **parametro di vita**:

$$\eta = e^{-\frac{q}{\beta}} \quad (31)$$

Ricavati dall'equazione il parametro di vita  $\eta$  e il parametro di scala  $\beta$  è possibile calcolare il **MTTF** attraverso la relazione:

$$MTTF = \eta \Gamma[1 + \frac{1}{\beta}] \quad (32)$$

dove  $\Gamma$  è una funzione del tipo  $\Gamma(n+1)=n!$ . Inoltre è possibile vedere che se (vedesi **Figura 27**):

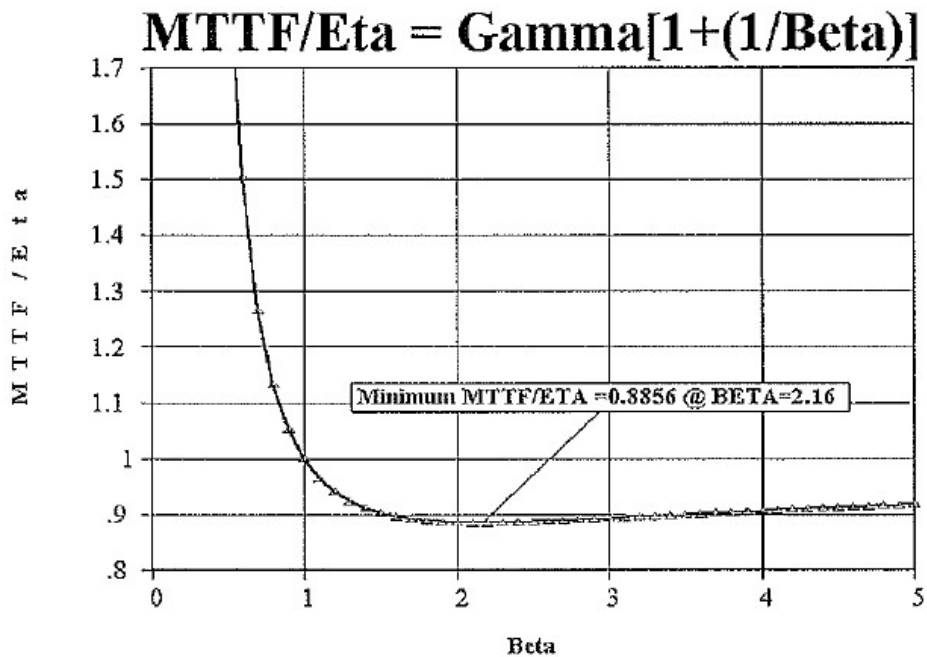


Figura 27: Grafico andamento MTTF al variare di  $\beta$

- $\beta=1$  allora  $MTTF=\eta$ , si ha quindi una distribuzione esponenziale negativa;

- $\beta > 1$  allora MTTF è minore del  $\eta$ ;
- $\beta < 1$  allora MTTF è maggiore del  $\eta$ ;
- $\beta = 0.5$  allora  $MTTF = 2\eta$ .

Linearizzata la funzione di inaffidabilità  $F(t)$  i passi successivi per poter tracciare il grafico sono:

1. Ordinare i dati in ordine crescente in base al tempo (qualsiasi sia la grandezza utilizzata per misurarlo).
2. Una volta ordinati ad ogni dato si associa un numero progressivo (*Rank*) e un progressivo inverso (*Reverse Rank*).
3. Successivamente si calcola l' $i$  o altrimenti chiamato l'*Adjusted rank* con la seguente formula:

$$i = \frac{(ReverseRank)(PreviousAdjustedRank) + (N + 1)}{ReverseRank + 1} \quad (33)$$

4. Calcolato  $i$  si è in grado di stimare la funzione  $F(t)$  tramite la tecnica di approssimazione di Bernard (*Median Rank*):

$$BernardMedianRank = \frac{(i - 0.3)}{(N + 0.4)} \quad (34)$$

5. Noti i dati e la funzione  $F(t)$  approssimata è possibile calcolare  $\ln(t)$  e  $\ln[\ln(\frac{1}{1-F(t)})]$  e tracciare il grafico.
6. Utilizzando la regressione lineare si ottiene la retta che approssima meglio la distribuzione di punti, e dalla retta si ricavano i parametri  $\beta, \eta$  e grazie a quest'ultimi si ottiene il MTTF.

#### 4.4 Tecniche decisionali multi-attributo o Multi-criterio

Le tecniche decisionali *Multi-attributo o Multi-criterio (Multiple Attribute Decision Making)* sono state sviluppate per fronteggiare situazioni in cui si deve scegliere tra un numero di alternative (progetti, componenti o fornitori etc.) sulla base di più attributi di vario genere che possono anche non essere facilmente misurabili.

Un attributo è un aspetto rappresentativo importante ai fini della scelta del decisore. Parametro prestazionale, elemento, criterio di valutazione e caratteristica sono tutti utilizzati come sinonimi di attributo.

L'impiego di queste tecniche mette in evidenza questioni teoriche ed applicative strettamente collegate con la scelta e la definizione degli attributi poiché possono presentarsi problemi relativi al loro numero, alla loro rilevanza e alle modalità attraverso cui si misurano.

Ci sono degli aspetti fondamentali da considerare nella scelta : il **numero di attributi** e la loro **indipendenza**.

Il numero di attributi non deve essere eccessivo per non rendere l'analisi troppo pesante con il rischio di risultare poi inefficace, ma nemmeno esiguo, per evitare di tralasciare informazioni utili rendendo poi l'analisi incompleta. Non esiste un numero ideale di attributi, di solito si consiglia di utilizzare un insieme di parametri che sia in grado di includere tutti gli aspetti principali per riuscire a scegliere un'alternativa.

Bisogna sempre considerare che caratteristiche ritenute fondamentali per il decisore potrebbero, invece, non esserlo per chi commissiona l'analisi o lo studio. Inoltre gli attributi scelti dovrebbero consentire di dare il maggior numero di considerazioni possibili.

Vi sono due metodi alternativi, ritenuti soddisfacenti, per selezionare il giusto numero di attributi. Il primo metodo consiste nel prendere in considerazione una lista di attributi iniziale esaustiva ed eliminare via via quelli considerati poco influenti per l'analisi o che hanno un'importanza marginale.

Il secondo metodo è il contrario del primo, si parte da una lista esigua di attributi considerati fondamentali aggiungendone poi altri meno importanti, così da effettuare subito un controllo su ogni attributo aggiuntivo.

**L'indipendenza** è un aspetto che ha una rilevanza sia teorica, riferita alla validità dei risultati finali dello studio, che operativa con riferimento agli approcci logico-matematici che vengono impiegati.

Come da definizione, un attributo è indipendente quando *"la sua inclusione nell'analisi non dipenda o non influenzi la scelta di includere altri attributi"*. L'indipendenza reciproca è un vincolo di importanza fondamentale e deve sempre esistere tra gli attributi che sono stati scelti per l'analisi poiché dal punto di vista delle valutazioni logico-matematiche, l'indipendenza tra gli attributi consente di valutare gli attributi singolarmente per ciascun alternativa

A livello intuitivo l'indipendenza può sembrare un concetto chiaro, ma nella pratica non è semplice verificarne il rispetto. Per questo motivo nella maggior parte dei casi chi effettua l'analisi ipotizza che gli attributi fondamentali siano indipendenti uno dall'altro, e poi nel corso dell'analisi, qualora si verifichi il contrario, si corregge.

Definiti e selezionati gli attributi si passa alla valutazione delle alternative. I metodi per la scelta possono essere divisi in quattro categorie:



- Metodi a eliminazione o *outranking*
- Metodi grafici
- Metodi a punteggio
- *Analytic Hierarchy Process*

#### 4.4.1 Metodi a eliminazione o outranking

Si tratta delle tecniche più semplici di studio delle alternative e risalgono agli 60'. Sono definite le più semplici perché non considerano il peso (che rispecchia l'importanza) degli attributi, ma tengono in considerazione solo la soddisfazione di uno standard ottimale o desiderato.

Queste tecniche molto spesso, vista la loro semplicità, vengono utilizzate in fase preliminare di selezione, per andare a effettuare una pre-selezione delle alternative con la finalità di concludere l'analisi con dei metodi più complessi su un numero minore di alternative.

Un esempio di queste tecniche potrebbe essere quello di fissare un criterio di riferimento rispetto al quale paragonare le alternative selezionando solo quelle che raggiungono lo standard in almeno uno degli attributi oppure eliminare tutte quelle che non lo raggiungono in tutti gli attributi.

Un'altra procedura potrebbe essere quella di ordinare gli attributi secondo l'importanza assegnata, scegliendo l'alternativa migliore in relazione all'attributo che è ritenuto più importante.

In sostanza queste tecniche sono un insieme di regole attraverso le quali è possibile eliminare man mano le alternative peggiori che non soddisfano uno o più requisiti essenziali. L'alternativa *ottima* (cioè quella che presenta il valore più alto in tutti gli attributi rispetto alle altre alternative) difficilmente esiste, visto che molto spesso le tecniche multi-criterio sono usate per valutare delle situazioni in cui gli attributi possono essere in qualche modo contrari tra loro.

Un criterio fondamentale per poter usare questi metodi è la possibilità di assegnare ad ogni attributo un valore numerico per ciascuna alternativa. Vengono poi effettuati confronti tra ogni alternativa e uno "standard ideale" o "standard minimo accettabile", oppure confronti diretti tra alternative. I metodi di confronto proposti nella letteratura specialistica sono numerosi, estremamente potenti ed immediati. Hanno però un limite, ossia considerano gli attributi singolarmente, trascurando il peso che ciascuno avrebbe in una valutazione complessiva di una data alternativa. Ecco alcuni esempi di queste tecniche:

- **Confronto delle alternative rispetto a uno standard:** Esistono due modi per condurre questo tipo di analisi. Uno è il metodo *disgiuntivo* dove un'alternativa viene eliminata se non soddisfa lo standard in tutti gli attributi, pertanto se un'alternativa soddisfa lo standard con almeno un attributo non viene eliminata.

Il metodo *coniuntivo* è l'inverso del precedente, considera quindi solo le alternative che soddisfa lo standard per tutti gli attributi.

- **Confronto sulla base delle dominanze:** Questa tecnica consiste nell'eliminare le alternative che sono dominate, cioè quelle che per ogni attributo vengono superate o pareggiate da un'altra alternativa. Avremo sempre una soluzione che sarà migliore di un'altra.
- **Lessicografica:** Questo metodo seleziona, a differenza degli altri metodi precedenti che eliminano le alternative che non soddisfano determinati criteri, l'alternativa sulla base di un confronto due a due. Prima di utilizzare questa tecnica bisogna elencare gli attributi in ordine di importanza, ed è quindi caratterizzata da una componente soggettiva. Verrà selezionata l'alternativa che ha il massimo valore nell'attributo ritenuto più importante.
- **eliminazione successiva basata sull'aspetto:** La tecnica mira a selezionare l'alternativa migliore procedendo per eliminazioni successive eliminando quelle che non soddisfano uno o più attributi. Anche in questo caso è necessaria una lista di importanza degli attributi, tenendo sempre conto delle priorità di chi richiede lo studio.

#### 4.4.2 Metodi grafici

I metodi grafici, a differenza delle tecniche indicate prima che si focalizzano essenzialmente su confronti diretti, hanno l'obiettivo di sintetizzare e rappresentare le situazioni tramite grafici o disegni. Questi metodi permettono all'utilizzatore di farsi una rapida idea del problema da affrontare.

#### 4.4.3 Metodi a punteggio

Sono metodi che sono nati nei primi anni 50'. Il loro funzionamento si basa sull'assegnare un peso a ciascun attributo considerato. I pesi vengono poi aggregati tra di loro attraverso un'opportuna funzione, fino ad ottenere un punteggio totale che consente di ordinare le diverse alternative.

Un modello a punteggio non è altro che una formula matematica o un'espressione algebrica che ha come variabile gli attributi che il decisore ritiene

fondamentali. L'attribuzione del peso all'attributo riflette la sua importanza rispetto agli altri.

Questi modelli possono incorporare sia elementi di valutazione oggettivi che soggettivi. I modelli più semplici fanno uso di formule additive, dove il punteggio finale non è che la somma pesata dei punteggi ottenuti da ciascuno degli attributi 35:

$$Y_j = w_1x_1 + w_2x_2 + \dots + w_nx_n = \sum_{i=1}^n w_ix_i \quad (35)$$

dove:

Y: Punteggio complessivo dell'alternativa  $x_i$ : il valore relativo all'attributo  $i$   $w_i$ : il peso dell'attributo  $i$ , ovvero la sua "importanza" numerica ai fini degli obiettivi generali da conseguire. Fissato dunque il peso per ciascun attributo, e misurato il valore di ognuno di questi per ciascuna alternativa, la formula (35) consente di calcolare il valore  $Y_j$  relativamente all'alternativa  $j$ , poi di ordinare le alternative sulla base di tali valori ed effettuare quindi la scelta.

#### 4.4.4 Analytic Hierarchy Process

La tecnica *Analytic Hierarchy Process* proposta e ideata da Saaty negli anni 80' si caratterizza come una procedura, maggiormente complessa rispetto a quelle illustrate precedentemente. In maniera molto semplificata si procede organizzando la valutazione in forma gerarchica. Questo consente di assegnare il peso ai vari attributi attraverso un sistema di valutazione comparativa tra coppie degli stessi. In altri termini, la decisione viene scomposta in vari livelli, dove il primo rappresenta l'obiettivo del problema (ossia ad esempio la selezione di un componente, un fornitore, un progetto), il secondo livello (e gli eventuali successivi) gli attributi e i sottoattributi ritenuti determinanti per il raggiungimento dell'obiettivo. Ciascun attributo o sottoattributo può essere scomposto fino a raggiungere il livello di dettaglio desiderato (vedesi **Figura 28**).

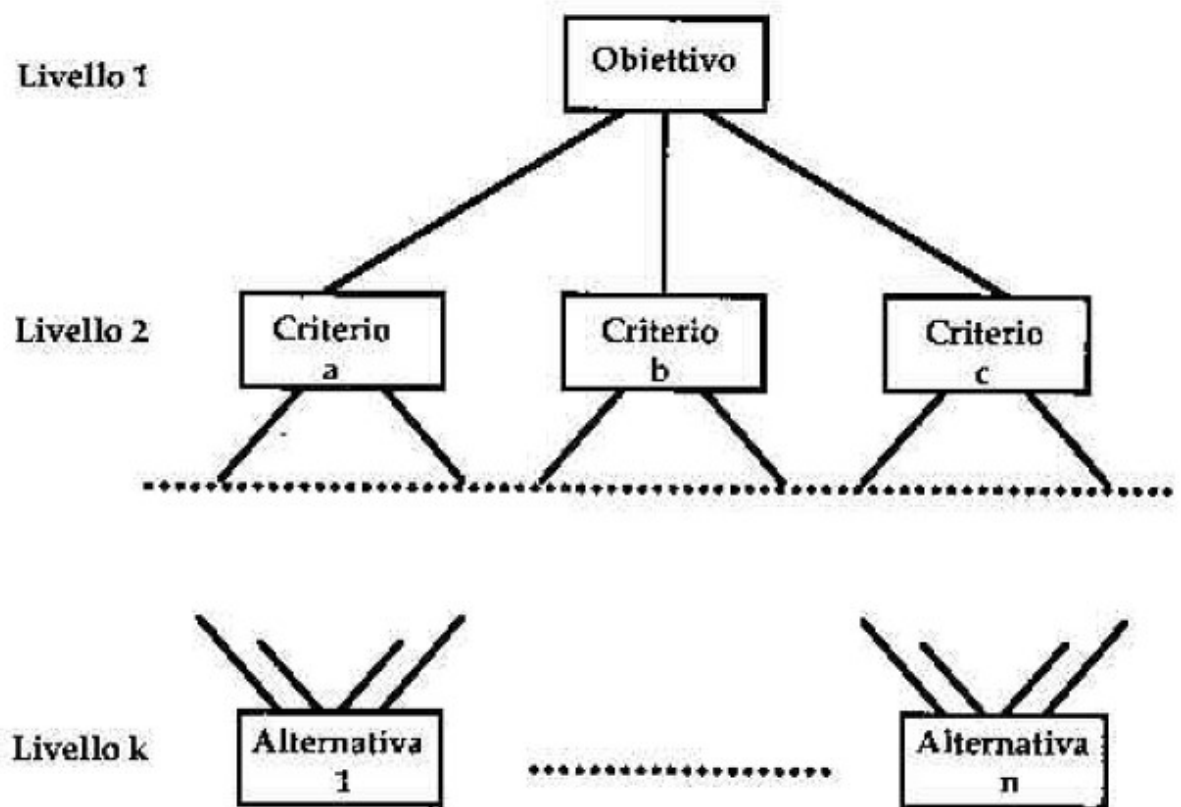


Figura 28: Scomposizione gerarchica nell'approccio AHP

## 5 Reti neurali

Le reti neurali sono un potente modello di apprendimento automatico che si ispira al funzionamento del cervello umano. Questi modelli matematici sono troppo semplici per ottenere una comprensione delle reti neurali biologiche, ma vengono impiegate per tentare di risolvere problemi ingegneristici di intelligenza artificiale in diverse aree o ambiti tecnologici, come il riconoscimento di immagini, la traduzione automatica, la generazione di testo, per simulare relazioni complesse tra ingressi e uscite che altre funzioni analitiche non riescono a rappresentare e molte altre applicazioni.

L'idea alla base delle reti neurali è quella di creare un sistema di elaborazione delle informazioni composto da unità di calcolo chiamati neuroni artificiali.

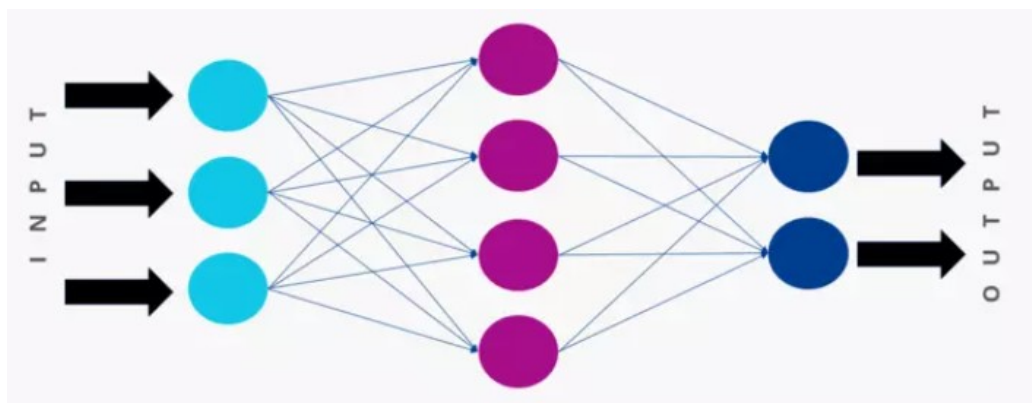


Figura 29: Schema di una rete neurale

I neuroni artificiali, anche detti nodi, sono organizzati in strati (vedesi **Figura 29**). La rete avrà un primo livello detto livello di input, uno o più livelli intermedi chiamati livelli o strati nascosti e l'ultimo livello detto livello di output. Ogni nodo è connesso a nodi negli strati successivi e precedenti tramite collegamenti pesati. I pesi delle connessioni determinano l'importanza relativa di un nodo rispetto agli altri nell'influenzare l'output della rete.

Esistono diversi tipi di reti neurali:

- Reti neurali **Feedforward** (flusso in avanti): sono la forma di rete neurale più semplice e in esse le connessioni fra i neuroni trasmettono i segnali solo nel verso che parte dallo strato di input e arriva a quello di output (come un grafo aciclico).

- Reti neurali **Ricorrenti (RNN)**: in questo tipo di rete alcuni neuroni sono collegati fra loro in loop, consentendo loro di modellare sequenze di dati e considerare l'informazione passata. Utilizzano quindi uno strato come memoria di stato che fornisce allo strato inferiore, in ingresso, una sequenza temporale di valori, modellandone il comportamento temporale. Questo tipo di rete è molto adatta all'analisi predittiva di sequenze di dati.
- Reti neurali **Convolutionali**: sono reti neurali più complesse finalizzate al riconoscimento di immagini e video, nell'elaborazione del linguaggio naturale, nella visione artificiale e nella bioinformatica. Può essere anche impiegata insieme a una rete ricorrente per la sintesi vocale.

Oltre alla tipologia, a differenziare le reti neurali ci sono anche i paradigmi di apprendimento, cioè di *Machine Learning* ciascuno corrispondente ad un particolare compito astratto di apprendimento. I principali sono tre:

- **Supervisionato (*supervised learning*)**: qualora si disponga di un insieme di dati per l'addestramento (*o training set*) comprendente esempi tipici di ingressi con le relative uscite loro corrispondenti: in tal modo la rete può imparare ad inferire la relazione che li lega. Successivamente, la rete è addestrata mediante un opportuno algoritmo (apprendimento supervisionato), il quale usa tali dati allo scopo di modificare i pesi e altri parametri della rete stessa in modo tale da minimizzare l'errore di previsione relativo all'insieme di addestramento.

Se l'addestramento ha successo, la rete impara a riconoscere la relazione incognita che lega le variabili di ingresso a quelle di uscita, ed è quindi in grado di fare previsioni anche laddove l'uscita non è nota a priori; in altri termini, l'obiettivo finale dell'apprendimento supervisionato è la previsione del valore dell'uscita per ogni valore valido dell'ingresso, basandosi soltanto su un numero limitato di esempi di corrispondenza (vale a dire, coppie di valori input-output). Per fare ciò, la rete deve essere infine dotata di un'adeguata capacità di generalizzazione, con riferimento a casi ad essa ignoti. Ciò consente di risolvere problemi di regressione o classificazione.

- **Non supervisionato (*unsupervised learning*)**: Anche qui l'obiettivo è far sì che si modifichino i pesi nella rete, ma utilizzando solo variabili in ingresso. Tali algoritmi tentano di raggruppare i dati di ingresso e di individuare pertanto degli opportuni cluster rappresentativi dei dati stessi, facendo uso tipicamente di metodi topologici o probabilistici. Questo tipo di apprendimento è molto impiegato per sviluppare tecniche di compressione dei dati.

- **Per rinforzo (*reinforcement learning*):** Nell'apprendimento con rinforzo, un opportuno algoritmo permette di individuare determinati modus operandi nell'ambiente esterno. Per questa classe di problemi è necessaria la presenza di un agente con capacità di percezione. Nella sua esplorazione dell'ambiente, la rete analizza le azioni che hanno impatto sull'ambiente e le retroazioni che l'ambiente produce, che possono essere di incentivazione o disincentivazione. Queste formano una conoscenza sfruttabile nell'esplorazione di situazioni ignote. Le reti neurali che utilizzano il *reinforcement learning* trovano largo impiego nella robotica, nell'automazione dei processi, nella produzione industriali e nell'economia.

L'apprendimento con rinforzo differisce da quello supervisionato poiché non sono mai presentate delle coppie input-output di esempi noti, né si procede alla correzione esplicita di azioni subottimali. Inoltre, l'algoritmo è focalizzato sulla prestazione in linea, la quale implica un bilanciamento tra esplorazione di situazioni ignote e sfruttamento della conoscenza corrente.

## 5.1 Applicazioni e proprietà

L'utilità dei modelli di rete neurale sta nel fatto che queste possono essere usate per comprendere una funzione utilizzando solo le osservazioni sui dati. Ciò è particolarmente utile nelle applicazioni in cui la complessità dei dati o la difficoltà di elaborazione rende la progettazione di una tale funzione impraticabile con i normali procedimenti di analisi manuale.

I compiti a cui le reti neurali sono applicate possono essere classificati nelle seguenti grandi categorie di applicazioni:

- funzioni di approssimazione, o di regressione, tra cui la previsione di serie temporali e la modellazione;
- classificazione, compresa la struttura e la sequenza di generici riconoscimenti, l'individuazione delle novità e il processo decisionale;
- l'elaborazione dei dati, compreso il "filtraggio" (eliminazione del rumore), il clustering, separazione di segnali e compressione.

Le aree di applicazione includono i sistemi di controllo (controllo di veicoli, controllo di processi), i simulatori di giochi e i processi decisionali, riconoscimento di pattern (sistemi radar, identificazione di volti, riconoscimento di oggetti, ecc), riconoscimenti di sequenze, diagnosi medica, applicazioni finanziarie e data mining.

## 5.2 Pregi e difetti

Uno dei pregi fondamentali delle reti neurali è che grazie alla loro costruzione sono in grado di lavorare in parallelo e quindi riescono a trattare molti dati. Sono quindi sofisticati sistemi di tipo statistico dotati di buona immunità al rumore. Infatti, se alcune unità del sistema dovessero funzionare male, la rete avrebbe delle riduzioni di prestazioni ma difficilmente si arriverebbe ad un blocco del sistema. I *software* di ultima generazione dedicati alle reti richiedono comunque buone conoscenze statistiche per interpretare i risultati. Da un punto di vista industriale, risultano efficaci quando si dispone di dati storici che possono essere trattati con gli algoritmi neurali. Ciò è di interesse per la produzione perché permette di estrarre dati e modelli senza effettuare ulteriori prove e sperimentazioni.

Naturalmente questi strumenti hanno anche dei difetti, infatti i modelli che vengono prodotti, anche se molto efficienti, non sono spiegabili in linguaggio simbolico umano. I risultati vanno quindi accettati "così come sono", cioè a differenza di un sistema algoritmico, dove si può esaminare passo passo il percorso che dall'input porta all'output, una rete neurale genera un risultato valido (o comunque con un'alta probabilità di essere accettabile) senza sapere come e perché tale risultato sia stato generato.

Inoltre la rete neurale sarà tanto efficiente quanto lo sono le variabili predittive utilizzate, infatti queste ultime devono essere scelte con cura.

Necessitano di una fase di addestramento del sistema che fissi i pesi dei singoli neuroni e questa fase può richiedere molto tempo, se il numero dei record e delle variabili analizzate è molto grande. Non esistono teoremi o modelli che permettano di definire la rete ottima, quindi la riuscita di una rete dipende molto dall'esperienza del creatore.



## 6 Caso di studio

Il lavoro realizzato in questa tesi è focalizzato sulla flotta ETR425, chiamata anche flotta Jazz, della DR Marche.

Il lavoro è stato suddiviso in fasi, partendo da una prima analisi della telediagnostica fino ad arrivare ai materiali sostituiti per trovare i componenti più critici del mezzo al fine di sviluppare e proporre una migliore strategia manutentiva.

Le fasi sono:

- Analisi telediagnostica;
- Analisi avvisi;
- Analisi ordini di lavoro e materiali sostituiti;
- Applicazione della Teoria di Weibull;
- Analisi economica;
- Applicazione delle reti neurali.

### 6.1 Analisi Telediagnostica

Come già spiegato nel paragrafo dedicato a tale tipologia di analisi, la telediagnostica è un sistema che permette di monitorare lo stato del treno e il suo funzionamento da remoto attraverso un cruscotto chiamato *Qlik Sense Hub*.

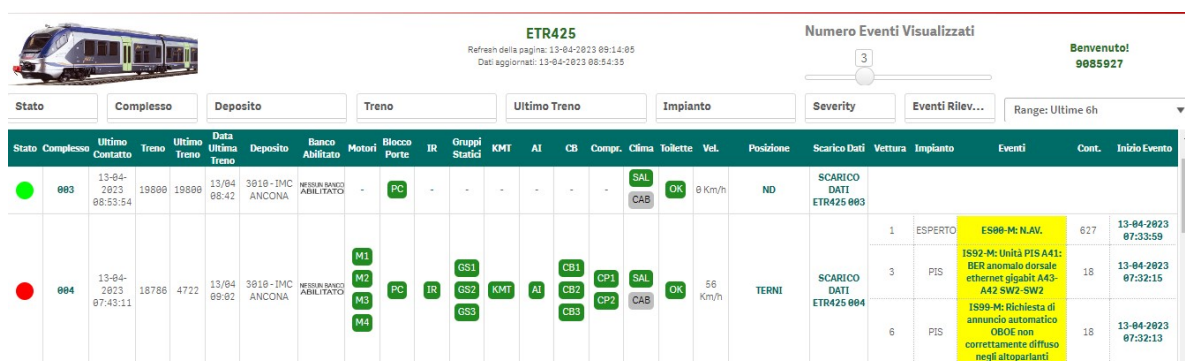


Figura 30: Cruscotto Qlik.

Come si vede chiaramente nell'esempio (vedesi **Figura 30**), il cruscotto dà informazioni in tempo reale sui principali impianti del mezzo attraverso

spie di diversi colori. In aggiunta, mostra gli eventi di avaria che si sono verificati con maggior frequenza dandone anche un conteggio.

Inoltre, selezionando uno specifico treno, è possibile scaricare lo storico delle ultime ventiquattro ore per analizzare tutti gli eventi nel dettaglio.

Tramite questo cruscotto si è in grado di risalire agli eventi dei tre mesi antecedenti. Per iniziare l'analisi in questione, innanzitutto, è stato effettuato uno scarico dei dati relativi ai tre mesi precedenti di ciascun Jazz appartenente alla flotta.

I dati vengono esportati in *Excel* e si ottiene, per ciascun Jazz, un file di questo tipo (vedesi **Figura 31**).

006	6	0237850	1664	Porte Esterne	26-11-2022 17:44:51	PO680-S: Porta A46-SX attuazione motore
006	4	0237850	2571	Toilet	26-11-2022 17:44:53	WC65-S: Unità Controllo WC: Attivazione Motore + Encoder della porta WC (M1+P1)
006	1	0237850	1184	Porte Esterne	26-11-2022 17:44:55	PO161-S: Porta A41-SX Illuminazione verde del pulsante passeggero
006	1	0237850	1201	Porte Esterne	26-11-2022 17:44:55	PO182-S: Porta A41-SX attuazione motore
006	3	0237850	1284	Porte Esterne	26-11-2022 17:44:55	PO271-S: Gradino A42-SX ritratto

Figura 31: Esempio dati telediagnostica su Excel

I file ottenuti per ciascun Jazz sono stati poi uniti in un unico file per essere filtrati. Il filtraggio è stato effettuato seguendo determinati *step*:

- Un primo filtraggio è stato effettuato confrontando gli eventi ottenuti dallo scarico dei dati degli ultimi tre mesi della flotta Jazz con una lista di regole redatta e utilizzata da Trenitalia S.p.A. per inviare e-mail di segnalazione e creare avvisi manutentivi in caso di avaria.

All'interno di questa lista si trovano una serie di regole ricavate da una combinazione di eventi e/o dati ambientali.

La lista viene sempre aggiornata periodicamente aggiungendo nuove regole a quelle già esistenti. Le regole naturalmente, prima di essere aggiunte, vengono testate per vedere se effettivamente quando si ha una data combinazione di eventi e dati si viene a verificare un'avaria a bordo del treno. Se la verifica della regola ha un esito positivo allora viene aggiunta, altrimenti ciò non sarà effettuato.

- Dopo questo primo filtraggio vengono eliminate tutte le righe degli eventi "ES500-M: N.AV" che risultano nella colonna "Guida operatore" con la voce "N.G" poiché non ci danno informazioni rilevanti (vedesi **Figura 32**).
- Il passo successivo è stato quello di eliminare tutti gli eventi di telediagnostica che si sono verificati a una distanza minore di un chilometro dalla stazione di Ancona. È stato effettuato questo tipo di filtraggio perché la stazione si trova in prossimità dell'impianto e spesso vengo

Rotabile	Vehicle	Treno	Id Evento	Impianto	Data Evento	Eventi	Fine Evento	Guida Operatore
007	1	*****	2520	ESPERTO	17-11-2022 08:27:26	ES00-M: N.AV.	17-11-2022 08:27:26	N.G.
007	1	*****	2520	ESPERTO	17-11-2022 08:27:37	ES00-M: N.AV.	17-11-2022 08:27:37	N.G.
007	1	*****	2520	ESPERTO	17-11-2022 08:27:42	ES00-M: N.AV.	17-11-2022 08:27:42	N.G.

Figura 32: Eventi eliminati

effettuate delle manutenzioni o prove a treno acceso che potrebbero generare un avviso.

- Come ultimo *step* sono stati eliminati tutti quegli eventi che riguardavano le luci delle porte esterne "PO281-S: Porta A42-SX Segnalazione esterna ingresso operativo (luce blu)".

Attraverso questo filtraggio è stato ottenuto un file composto da tutti quegli eventi che possono generare un'avaria. Con gli eventi che sono stati ottenuti dal filtraggio è stato effettuato prima un raggruppamento per rotabile andando ad inserire i dati su istogrammi con la finalità di evidenziare l'avaria più frequente su ciascun rotabile su ciascun rotabile.

Successivamente gli eventi sono stati raggruppati per appartenenza ad un determinato impianto, ad esempio tutti gli eventi che facevano riferimento alle porte sono stati inseriti nella categoria "Porte esterne" (vedesi **Figura 33**).

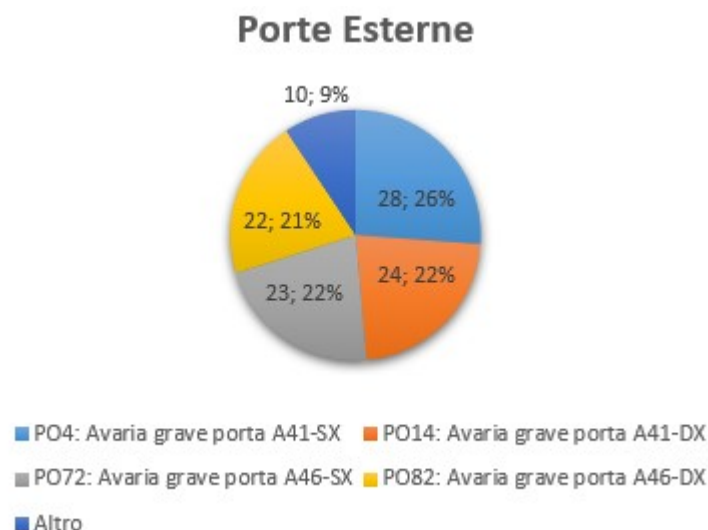


Figura 33: Esempio di raggruppamento in categorie

Con il raggruppamento abbiamo una visione d'insieme dove è possibile visualizzare quale sottosistema o impianto del treno è o potrebbe essere soggetto ad avarie. Il risultato è stato il seguente:

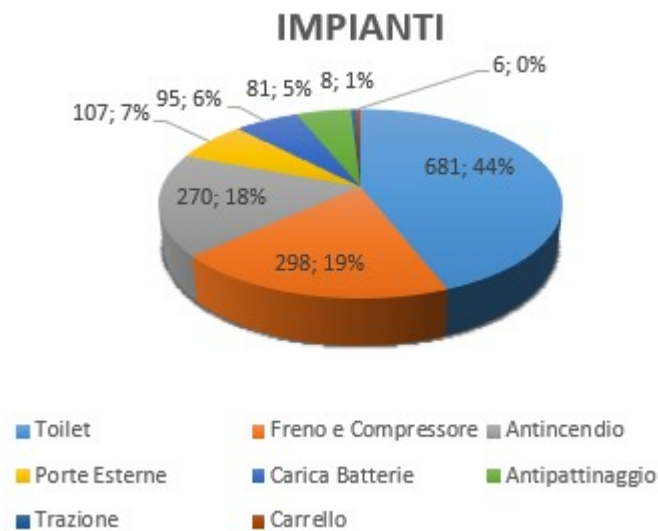


Figura 34: Totale degli eventi per ogni impianto

Si può riscontrare a questo punto come (vedesi **Figura 34**) gli impianti che sono o potrebbero essere soggetti ad avarie siano in ordine decrescente come segue: la Toilette, il Freno e Compressore, l'Antincendio e Porte esterne.

## 6.2 Analisi Avvisi

Successivamente alla verifica degli eventi generati dal sistema diagnostico del veicolo, è stata effettuata un'analisi degli avvisi manutentivi dell'impianto.

Come già detto, gli avvisi sono messaggi generati da diverse fonti che hanno lo scopo di segnalare necessità di interventi manutentivi. Tutti gli avvisi, indipendentemente dalla fonte che li ha generati, sono raccolti nel Sistema Informativo RSMS.

Per poter effettuare un'analisi di essi e ricavarne dei risultati, è necessario estrarre tali avvisi dal sistema RSMS attraverso degli appositi comandi o transazioni. La transazione che deve essere utilizzata in questo caso è la **IW28** la quale va inserita nella casella di testo in alto a sinistra (vedesi **Figura 35**).

Dopo aver inserito la **IW28** nella casella di testo e premuto il tasto *Invio*, è possibile visualizzare un'ulteriore finestra che consente di inserire, sempre in apposite caselle di testo, l'impianto in cui gli avvisi sono stati generati e l'arco temporale desiderato di generazione di quest'ultimi.

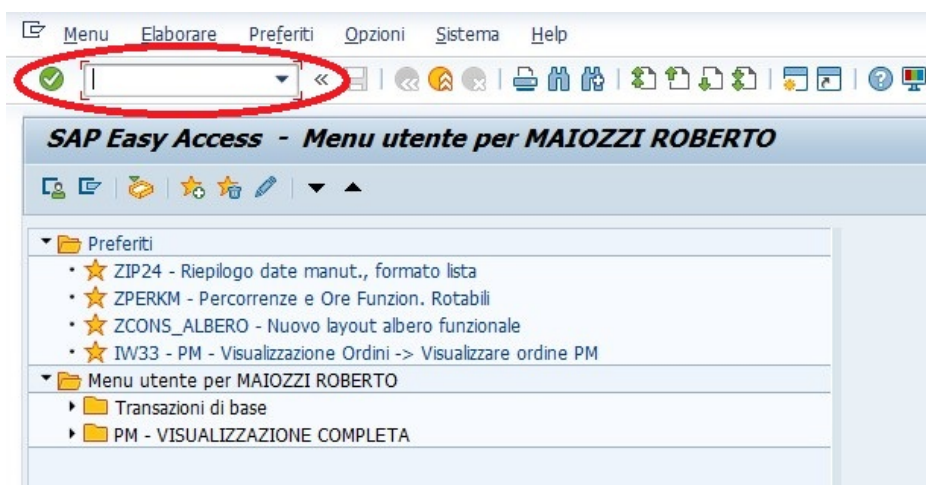


Figura 35: Schermata sistema informatico SAP

L'arco temporale utilizzato per l'analisi degli eventi generati dal Sistema Diagnostico è di novanta giorni, più precisamente si riferisce, nel presente lavoro, al periodo che va dal 17 novembre 2022 al 15 febbraio 2023. Tale temporalità risulta essere troppo limitata per poter estrarre un numero di avvisi manutentivi tale da poter effettuare un'analisi sull'affidabilità.

Per questo motivo l'orizzonte temporale è stato ampliato andando a coprire tre anni, dal 15 febbraio 2020 al 15 febbraio 2023 (data in cui è stata effettuata l'estrazione).

Inseriti i filtri nelle apposite caselle di testo il sistema restituisce i dati in tabelle con un *layout* predefinito ma modificabile. Per evitare il rischio di perdere possibili informazioni utili è stato cambiato il *layout* aggiungendo tutte le colonne disponibili.

Al momento dell'estrazione dal sistema RSMS i dati vengono esportati su un foglio elettronico *Excel* su cui è possibile eseguire le operazioni di analisi necessarie (vedesi **Figura 36**).

A	B	C	D	E
Tipo avviso	Div. per c.di lavoro	Ordine	Numero di serie	Descrizione
ZA	3010	100012689309	948344255054	Rubinetto freno continuo spiombato
ZA	3010	100012693367	948304250186	Porta guasta
ZB	3010	100012685509	948344250063	Tornitura dischi freno
ZB	3010	100012685303	948344255716	Trombe da controllare
ZC	TREN			Eseguita PR46M - Pulizie PR3 (1 set)

Figura 36: Foglio Excel scaricato dal sistema

Ottenuto il foglio elettronico contenente gli avvisi manutentivi degli ultimi tre anni si è avviata l'analisi effettuando una prima modifica e filtraggio di questi dati.

Per prima cosa sono state eliminate tutte le colonne vuote (non contenenti dati) e tutte quelle che non presentavano informazioni utili ai fini dell'analisi.

Successivamente è stato effettuato un primo filtraggio dei dati lavorando sulle colonne **Tipo avviso**, **Stato Sistema** e **Stato Utente**. In generale, la prima colonna restituisce la tipologia di avviso o chi l'ha generato e tutto questo è visionabile nella figura 36, in cui vi sono tutti gli avvisi anche quelli **ZS** e **ZC** che riguardano rispettivamente avvisi per modifiche di sicurezza e avvisi di manutenzione programmata. Le righe contenenti **ZS** e **ZC**, situate nella prima colonna **Tipo avviso**, sono state poi eliminate. Rimangono pertanto solo gli avvisi del tipo **ZA**, **ZB** e **ZC**, ossia quelli generati rispettivamente dal personale di bordo, dall'officina e dalla telediagnostica.

Nella colonna **Stato utente**, che restituisce lo stato in cui si trova l'avviso, sono stati lasciati solo i COLL (collaudati) e i COLL-LIM (collaudati con limitazioni) eliminando i RINV (rinvii) per non rischiare di contare più volte uno stesso avviso e andare quindi a falsificare i dati.

Nella colonna **Stato Sistema** sono stati eliminati tutti gli avvisi FCAN-MECO (Flag cancellazione-Messaggio Collaudato) e FCAN-MECO-ORAT (Flag Cancellazione-Messaggio Collaudato-Ordine attribuito), che sono tutti quegli avvisi generati per errore e attribuiti a un ordine e poi cancellati.

Inoltre sono stati eliminati anche tutti gli avvisi MECO (Messaggio collaudato) che sono riferiti alle operazioni di pulizia del veicolo e che quindi non sono rilevanti per questa analisi.

Quello che rimane dopo aver eseguito questi primi passaggi sono tutti quegli avvisi **ZA**, **ZB**, **ZD MECO-ORAT** che sono stati generati dal personale di bordo, dall'officina o dal sistema diagnostico attribuiti a un ordine chiuso.

Ordine	Ordine superiore	Ordine Principale	Ora inizio richiesta ordine	Data inizio cardine	Data rilascio ordine	Apertura cardine Ordine	Apertura cardine Ordine estesa	Ora prima chiusura Tecnica Ordine	Data prima chiusura Tecnica Ordine	Chiusura tecnica ordine	Giorni chiusura tecnica ordine estesa
100008075901			09:00:00	15/12/2020		44180,38	15/12/2020 09:00	10:26:18	15/12/2020	44180,43	15/12/2020 10:26
100009737661		100009737661	08:00:00	28/02/2020		43889,33	28/02/2020 08:00	13:03:10	28/02/2020	43889,54	28/02/2020 13:03
100009737661		100009737661	08:00:00	28/02/2020		43889,33	28/02/2020 08:00	13:03:10	28/02/2020	43889,54	28/02/2020 13:03
100009737661		100009737661	08:00:00	28/02/2020		43889,33	28/02/2020 08:00	13:03:10	28/02/2020	43889,54	28/02/2020 13:03
100009738237			08:00:00	27/10/2020		44131,33	27/10/2020 08:00	11:19:32	27/10/2020	44131,47	27/10/2020 11:19
100009738237			08:00:00	27/10/2020		44131,33	27/10/2020 08:00	11:19:32	27/10/2020	44131,47	27/10/2020 11:19
100010100500			08:00:00	15/12/2020		44180,33	15/12/2020 08:00	09:45:41	15/12/2020	44180,41	15/12/2020 09:45
100010145120			08:00:00	03/11/2020		44138,33	03/11/2020 08:00	13:15:18	03/11/2020	44138,55	03/11/2020 13:15

Figura 37: Colonne per il calcolo dei tempi di attraversamento di un avviso

Come precedentemente detto, quest'analisi fa parte di un'indagine più ampia che ci consentirà di ottenere i componenti che sono stati sostituiti più

volte e che quindi risultano essere maggiormente critici. Inoltre, dagli avvisi è stata effettuata anche una verifica dei tempi di attraversamento medi, cioè il tempo che intercorre tra la creazione dell'avviso e la sua esecuzione.

Per effettuare ciò, al foglio *Excel* è stato cambiato il *layout* aggiungendo, modificando e spostando delle colonne per facilitarne la lettura e aggiungere informazioni. In particolare sono state aggiunte colonne contenenti una descrizione estesa dell'avviso, permettendo di avere maggiori informazioni riguardanti il tipo di guasto o l'avaria rilevata, e colonne contenenti la data e l'ora di inizio nonché la chiusura ordine (vedesi **Figura 37**).

Le colonne aggiunte sono sempre state estratte dal Sistema Informativo attraverso transazioni diverse, e i dati in esse contenuti sono stati inseriti nella loro riga corrispondente grazie alla funzione *Cerca Verticale* di *Excel*.

Per poter calcolare i tempi di attraversamento di un avviso, poiché ora e data di *Creazione avviso*, *Apertura ordine* e *Chiusura tecnica ordine* si trovano in colonne separate, è stata aggiunta un'ulteriore colonna dove sono state sommate data e ora convertendole poi in un formato numero. Nella colonna successiva questo numero è stato convertito in un formato personalizzato (gg/mm/aaaa hh:mm).

Eseguito questo passaggio è possibile calcolare il tempo totale di attraversamento come:

$$T_{tot} = T1 + T2 \quad (36)$$

dove (vedesi **Figura 38**):

- $T_{tot}$  è il tempo di attraversamento totale;
- $T1$  è il tempo che intercorre tra la creazione dell'avviso e l'attribuzione ad un ordine (dato quindi dalla differenza di *Apertura cardine ordine* e *Apertura avviso*);
- $T2$  è il tempo che intercorre tra l'attribuzione dell'avviso all'ordine ossia l'apertura dell'ordine e la sua chiusura (dato quindi dalla differenza di *Chiusura tecnica ordine* e *Apertura cardine ordine*);

Attraverso alla formula 36 è stato possibile calcolare il tempo totale di attraversamento di tutti gli avvisi. Dopo aver calcolato quest'ultimo, sono stati calcolati i tempi medi  $T1$  (tempo medio di entrata in manutenzione),  $T2$  (tempo medio di manutenzione) e  $T_{tot}$  (tempo medio totale di attraversamento) per gli avvisi ZA, ZB, ZC.

Nel foglio elettronico degli avvisi è presente anche una colonna chiamata *Ordine* e all'interno delle righe di questa colonna ci sono dei numeri che corrispondono al numero dell'ordine a cui l'avviso appartiene. Come già specificato in precedenza, gli avvisi non vengono lavorati singolarmente ma vengono

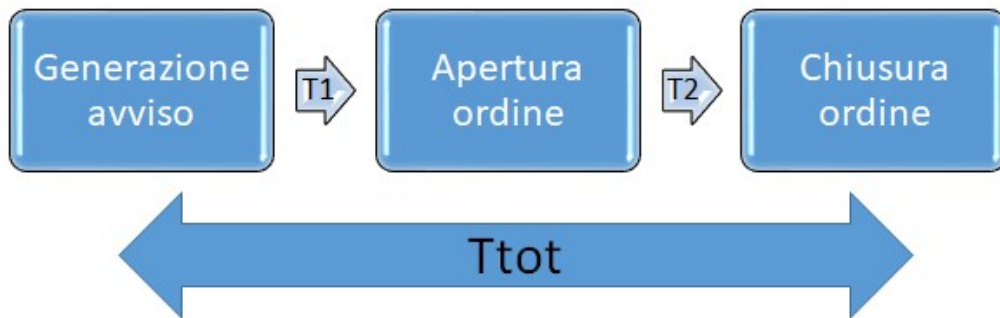


Figura 38: Schema del tempo di attraversamento

raccolti per sede tecnica attraverso l'utilizzo degli ordini e successivamente lavorati insieme. L'ordine quindi è generato dall'impianto e rappresenta l'intervento manutentivo su una serie di avvisi.

### 6.3 Analisi ordini di lavoro e materiali sostituiti

Dopo aver realizzato un'analisi degli avvisi manutentivi in questa fase si effettua un'analisi degli ordini di lavoro, relativi sempre allo stesso orizzonte temporale, a cui, grazie al Sistema Informativo Gestionale RSMS, vengono associati i relativi materiali utilizzati per mantenere il mezzo.

Stato ordine			
<input type="checkbox"/> In sospeso	<input type="checkbox"/> in elab.	<input checked="" type="checkbox"/> Concluso	<input checked="" type="checkbox"/> Storico
Prof. sel.	<input type="text"/>	Indirizzo ✕	
Selezione ordine			
Ordine	<input type="text"/>	A	<input type="text"/>
Tipo di ordine	<input type="text"/>	A	<input type="text"/>
Sede tecnica	<input type="text"/>	A	<input type="text"/>
Equipment	<input type="text"/>	A	<input type="text"/>
Avviso	<input type="text"/>	A	<input type="text"/>
Centro lavoro resp.	<input type="text"/>	A	<input type="text"/>
Div. per centro lav.	<input type="text"/>	A	<input type="text"/>
Periodo	<input type="text" value="15022020"/>	fino	<input type="text" value="15.02.2023"/>

Figura 39: Finestra Visualizzazione ordini di lavoro

Gli ordinativi di lavoro vengono quindi estratti dal sistema RSMS utilizzando l'apposita transazione *IW39-Visualizzare Ordini*. Eseguita que-



st'ultima si apre un'ulteriore finestra con nuovi campi (vedesi **Figura 39**) in cui vengono effettuate le seguenti operazioni:

- devono essere spuntate le caselle "*Concluso*" e "*Storico*";
- deve essere riempito il campo "*Ordine*" con la lista del numero degli ordini. La lista del numero degli ordini di lavoro viene ricavata da una colonna del file "Avvisi", estratto precedentemente, che all'interno di ogni riga contiene un numero che rappresenta l'ordine a cui l'avviso è associato. Prendendo tutti i valori di quella colonna ed eliminando i duplicati si ottiene la lista di ordinativi di lavoro da inserire nell'apposito campo.
- occorre inserire nel campo "*Periodo*" l'orizzonte temporale scelto, che è rimasto ovviamente lo stesso utilizzato per l'estrazione degli avvisi, cioè dal 15 febbraio 2020 al 15 febbraio 2023.

L'estrazione del file degli ordini di lavoro, in realtà, era già stata effettuata in precedenza quando è stato calcolato il tempo di attraversamento degli avvisi. Il file è stato infatti utilizzato per ricavare l'ora e la data di *apertura cardine* e *chiusura cardine* dell'ordine utili per calcolare  $T1$  e  $T2$  (vedesi **Figura 40**).

D	E	F	G
Data inizio - ora	Data inizio cardine	Ora Prima Chiusura Tecnica	Data Prima Chiusura Tecnica
08:00:00	10/06/2021	10:30:02	10/06/2021
08:00:00	09/06/2021	10:15:55	09/06/2021
08:00:00	21/06/2021	11:14:15	22/06/2021
08:00:00	16/06/2021	16:04:50	16/06/2021
07:00:00	15/06/2021	15:42:31	15/06/2021
09:00:00	20/05/2021	11:33:55	20/05/2021
06:00:00	02/06/2021	09:03:21	02/06/2021

Figura 40: Colonne usate per il calcolo dei tempi di attraversamento

La lista degli ordinativi di lavoro non è stata utile solo per ottenere le date per calcolare i tempi di attraversamento, ma è stata utilizzata anche con lo scopo di individuare i componenti critici, cioè quei componenti che vengono sostituiti più volte.

Per ottenere tutti i materiali sostituiti sulla flotta Jazz bisogna ancora una volta estrarre i dati dal Sistema Informativo RSMS. Per questa estrazione si

utilizza una transazione diversa, cioè la *IW3M-Lista movimenti merce per ordine* che ci consente, partendo dal numero dell'ordine, di ottenere i materiali ad esso associati.

Inserendo la transazione nel campo in alto a sinistra (figura.35) si apre una finestra contenente il campo dove inserire la lista che racchiude il numero degli ordini di lavoro (vedesi **Figura 41**).

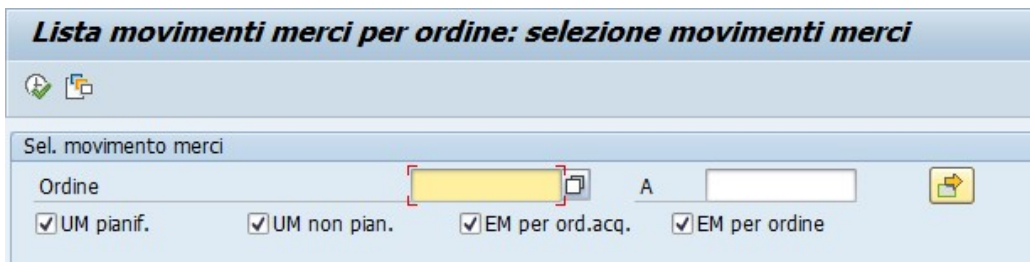


Figura 41: Finestra lista movimenti merce per ordine

Come accaduto per gli avvisi, il sistema restituisce i dati in tabelle con un proprio *layout* predefinito, ma modificabile. Anche in questo caso è stato cambiato il *layout* aggiungendo tutte le colonne disponibili e, qualora non fossero indispensabili o vuote, eliminandole successivamente.

I dati che vengono restituiti dal sistema RSMS sono esportati su un foglio elettronico *Excel* e viene effettuata una prima modifica cancellando le colonne che non contengono informazioni utili o quelle che non hanno dati al loro interno.

All'interno di questo foglio elettronico le colonne contenenti informazioni utili sono:

- **Ordine**: restituisce il numero d'ordine a cui il materiale appartiene.
- **Magazzino** e **Quantità**: specificano rispettivamente la classe del materiale, che può essere di consumo (SCOR) o un materiale riparabile (RIPA/RIPB) e le unità utilizzate per il rispettivo ordine.
- **Sede tecnica**: specifica su quale treno della flotta viene utilizzato il materiale.
- **Testo esteso**: dà una descrizione completa del materiale.
- **Materiale**: è una colonna molto importante perché all'interno delle righe si hanno i **categorici**. Il categorico è un codice che consente di individuare univocamente un materiale, pertanto ogni materiale avrà

Ordine	Materiale	Impianto	Quantità	Divisa	Imp. divisa int.	Prezzo Unitario	Magazzino	Tipo movimento	Indic. dare/avere	Sede tecnica
100011592640	686214	Impianto pneumatico	1	EUR	2,18	2,18	SCOR	261	H	ETR425007
100012143086	686214	Impianto pneumatico	2	EUR	4,36	2,18	SCOR	261	H	ETR425113
100012825411	691373	Compressore	10	EUR	24,80	2,48	SCOR	261	H	ETR425005
100012825411	691373	Compressore	10	EUR	24,80	2,48	SCOR	261	H	ETR425005
100012232295	705003	Toilet	1	EUR	180,00	180,00	SCOR	261	H	ETR425007
100012364054	705006	Antincendio	1	EUR	397,00	397,00	SCOR	261	H	ETR425008
100011916494	705006	Porte	1	EUR	397,00	397,00	SCOR	261	H	ETR425001

Figura 42: Foglio elettronico dei materiali

il suo categorico. Inserendo il categorico nel sistema RSMS e utilizzando l'apposita transazione **ZMAT** è possibile visualizzare tutte le informazioni associate ad esso.

I vari materiali impiegati sono stati suddivisi per impianto (ad esempio Modulo Carica Batterie è stato inserito nell'Impianto batterie, Coppia di Guarnizioni di Attrito è stata inserita nell'Impianto Freno ecc...) per facilitare un primo conteggio ed evidenziare quale apparato principale del treno avesse subito più interventi manutentivi (vedesi **Figura 43**).

Nel foglio elettronico è stata perciò aggiunta una nuova colonna chiamata **Impianto** nelle cui righe sono contenuti gli impianti principali del treno (vedesi **Figura 42**)

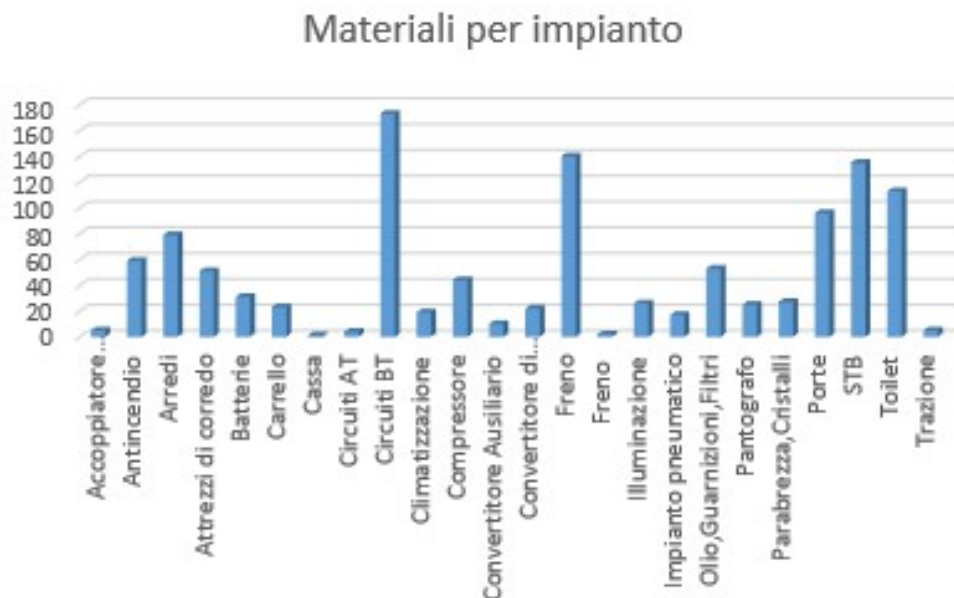


Figura 43: Materiali impiegati su ciascun impianto

Per ottenere i componenti che presentano una frequenza di guasto maggiore, definiti anche come componenti critici all'interno dello stesso file *Excel*,

è stato realizzato un altro foglio elettronico. Quest'ultimo sfrutta gli stessi dati del precedente con la differenza che, oltre a un raggruppamento per impianto, i materiali sono stati raccolti per categorico.

Inoltre, per ogni categorico viene calcolato anche il costo medio (vedesi **Figura 44**), poiché nel corso degli anni un materiale potrebbe aver subito una variazione del prezzo. Il costo medio, insieme alla frequenza di guasto, facilita una valutazione del componente critico più completa che consente pertanto di selezionare quel componente che ha una frequenza e un costo maggiori.

Categorico ▾	Impianto ▾	Num. ↓↑	Prezzo Medio ▾
973663	Porte	45	47,55 €
705053	Freno	31	28,35 €
705035	Toilet	28	690,10 €
705213	Circuiti BT	25	4.852,55 €
705211	Circuiti BT	22	6.003,50 €
705252	Freno	20	9.212,00 €

Figura 44: Materiali raggruppati per categorico con relativo costo

Dalla lista generata sono stati scelti dei componenti, dieci in totale, in funzione del loro prezzo e del numero di parti utilizzate nel corso dei tre anni. Per selezionare tra questi il componente a cui verrà successivamente applicato il **Metodo di Weibull** in grado di calcolarne l'affidabilità, è stata utilizzata la tecnica della **Matrice Multi-attributo o Multi-criterio**.

La matrice contiene nella prima riga i componenti che sono stati scelti dalla lista, mentre nella prima colonna ci sono i criteri su cui ogni componente viene valutato. A ciascun criterio viene dato, in maniera soggettiva, un peso che, inserito nella seconda colonna, riflette la sua importanza rispetto agli altri.

Nelle caselle all'interno della matrice viene dato un giudizio o voto, sempre in maniera soggettiva, a ciascun componente che ci indica quanto quel componente soddisfi quel criterio. Per l'assegnazione dei punteggi è stata utilizzata una scala numerica da 1 a 10 (vedesi **Figura 45**).

Per il criterio "*Prezzo*" l'assegnazione del giudizio è stata effettuata dando punteggio più alto al componente più costoso, mentre per gli altri componenti il giudizio è stato dato utilizzando una proporzione. Stesso metodo è stato eseguito per il criterio "*Quantità*".

Al criterio "*Impianto*" è stato dato il giudizio in base all'importanza dell'impianto a cui il componente appartiene, il cui eventuale guasto avrebbe

potuto compromettere il servizio del treno o rovinare l'esperienza di viaggio di un utente.

Nell'assegnare i voti al criterio "*Tempo di lavoro*", è stato dato il punteggio più alto ai componenti che hanno un tempo di lavorazione più lungo, i restanti giudizi sono stati ottenuti sempre con una proporzione. Anche per il criterio "*Tempo di consegna*", che indica in quanto tempo questi materiali sono a disposizione una volta ordinati, è stato utilizzato lo stesso metodo del "*Tempo di lavoro*". Entrambi i tempi sono stati chiesti in impianto rispettivamente ai Capi Tecnici e all'Ufficio Ingegneria.

CRITERI	PESO	COMPONENTE(CATEGORICO)									
		Compressore CRV65(705290)	Accoppiatore automatico(705309)	Regolatore di trazione AC3(705648)	Centralina TCU-8(705184)	Modulo CLT-B(706436)	Pantografo ATR95 3kV(705565)	Cassa batterie(705555)	Centralina elettronica freno (BCU)(705284)	Valvola WC completa(705035)	Modulo bombole complete per antincendio(706391)
Prezzo	25	6	10	5	4	4	4	3	3	1	6
Quantità	20	2	1	2	1	1	2	2	3	10	6
Impianto	25	8	3	6	6	5	6	7	8	6	10
Tempo di lavorazione	20	10	10	5	3	5	5	5	5	5	5
Tempo di consegna	10	10	2	8	7	10	10	10	5	3	1
	100	630	565	495	400	445	490	490	485	505	630

Figura 45: Matrice Multi-attributo

Riempita la matrice con i giudizi e i pesi dei criteri (la somma dei pesi dei criteri deve essere uguale a cento) si può calcolare il punteggio totale ottenuto da ciascun componente. Tale punteggio totale si calcola con la seguente formula (37):

$$TOT_j = \sum_{i=1}^m PESO_i * GIUDIZIO_{ij} \quad \forall j = 1 \dots n \quad (37)$$

Dai risultati dell'utilizzo della matrice sembrerebbe che il componente più critico sia il *compressore CRV65*. Successivamente è emerso che, in realtà, gli avvisi che riguardavano il compressore non erano segnalazioni di guasto, ma componenti che dovevano essere sostituiti durante una manutenzione programmata e che per mancanza di componenti sostitutivi o tempi di attraversamento troppo lunghi sono stati rinviati.

Arrivati i componenti sostitutivi, per poter aprire nuovi ordini su cui scaricare i materiali, sono stati creati nuovi avvisi che sono riusciti a *bypassare* il filtraggio iniziale. Il secondo componente con il punteggio più alto è il *Modulo bombole complete per l'antincendio*. Le bombole, come da normativa, devono essere sostituite entro un certo periodo di tempo e, per effettuare la loro sostituzione, viene aperto un avviso. In questo caso gli avvisi manutentivi erano riferiti a una scadenza temporale del componente e non a un guasto, non è stato quindi possibile applicare una teoria per calcolarne l'affidabilità.

Il componente critico che alla fine è stato selezionato per studiare la sua affidabilità attraverso la *Teoria di Weibull* è la "*Valvola WC completa*".

## 6.4 Applicazione della Teoria di Weibull

Dallo studio iniziato con l'analisi della telediagnostica, passando per gli avvisi manutentivi e ordini di lavoro e arrivando ai materiali utilizzati, è emerso che il componente definito critico è la Valvola di scarico a tagliola del Sistema WC.

Come già specificato nel capitolo.2 a bordo dell'ETR425 o Jazz è presente un solo bagno collocato nell'elemento centrale A43 e, proprio per questo motivo, un malfunzionamento o un guasto della valvola a tagliola (o valvola di scarico) creerebbe un disservizio andando a generare un disagio per gli utenti, soprattutto per tutti quelli che affrontano i viaggi più lunghi.

Si può quindi affermare che il Sistema Toilette e tutti i componenti che lo riguardano, come scritto anche nel *Piano Manutentivo di primo livello*, rientrano nella categoria **C-Confort di servizio**.

Nel *Piano manutentivo di primo livello* redatto dal costruttore, in questo caso Alstom, viene specificato quale operazione manutentiva effettuare sulla valvola e con quale scadenza temporale (vedesi **Figura 46**).

Codice A-C-E-P	Codice RAMS	Step number	Descrizione sistema	Azione manutentiva	CO	VI	RT	CBM	Intervalli a mesi o a km	Categoria S-R-C	Documento di riferimento	Note
C	19.1.4	-	Gruppo tazza (Toilet)							-	-	-
C	19.1.4.1	1	Valvola di scarico	Sostituzione (componenti interni: kit giunti)					36 mesi	C	ETR425/ETR324-MR1-15A-TC011	
C	19.1.4.1	2	Valvola di scarico	Sostituzione del corpo valvola di scarico					36 mesi	C	ETR425/ETR324-MR1-15A-TC011	

Figura 46: Piano manutentivo

Come risulta evidente, le uniche operazioni che si effettuano sulla valvola sono la "*Sostituzione dei componenti interni*" e "*Sostituzione del corpo valvola di scarico*". Queste operazioni vengono effettuate con scadenza temporale trentasei mesi.

La valvola normalmente è chiusa e controllata da un attuatore pneumatico a doppio effetto, è installata tra lo scarico della tazza ed il serbatoio reflui e la sua funzione è proprio quella di isolare questi ultimi due elementi aprendosi quando un utente preme il pulsante del WC ed il livello di vuoto nel serbatoio è corretto.

L'apertura della valvola consente il passaggio dello scarico nel serbatoio reflui e la chiusura avviene automaticamente quando la tazza è completamente svuotata.

Il corpo della valvola che, come da piano manutentivo viene sostituito ogni trentasei mesi, è realizzato in acciaio inossidabile e al suo interno possiede uno strato auto-lubrificante.

Per quanto riguarda la manutenzione correttiva da effettuare alla presenza di un guasto improvviso, la valvola di scarico deve essere sostituita quando si presenta:

- Il modulo è guasto, non è presente acqua nel sifone e il *display* della centralina mostra un errore.
- Il modulo è guasto, il sanitario è pieno d'acqua e il *display* della centralina mostra un errore.
- È presente un eccesso d'acqua sotto il coperchio del WC.

Per l'applicazione della teoria di Weibull è necessario monitorare il tempo di funzionamento del componente utilizzando una qualsiasi unità di misura (chilometri percorsi, cicli di funzionamento, giorni, ore di funzionamento ecc.). In questo studio sono stati utilizzati prima i chilometri percorsi e successivamente è stato ripetuto il tutto utilizzando i cicli di funzionamento.

**Percorrenze e ore di funzionamento rotabili per periodo di analisi**

Parametri di selezione

Sede tecnica	<input type="text"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="text"/>	
Tipo oggetto	<input type="text"/>	A	<input type="text"/>	
Equipment	<input type="text"/>	A	<input type="text"/>	
Punto di misura	<input type="text"/>	A	<input type="text"/>	
Num. inventario	<input type="text"/>	A	<input type="text"/>	
Data della misurazione	<input checked="" type="checkbox"/>	A	<input type="text"/>	
Impianto assegnatario	<input type="text"/>	A	<input type="text"/>	
Settore contabile	<input type="text"/>	A	<input type="text"/>	

Figura 47: Schermata per il calcolo delle percorrenze chilometriche

Per trovare l'intervallo di funzionamento di ciascuna valvola sono state prese in considerazione le date dell'ordine di lavoro a cui era assegnato l'avviso della segnalazione del guasto della valvola e le date delle precedenti manutenzioni programmate *36 mesi*.

Le manutenzioni programmate precedenti, cioè le date di installazione delle valvole, sono state ricavate utilizzando il Sistema Informativo RSMS attraverso la transazione ***ZIP24-Riepilogo date manutenzione***.

Per conoscere i chilometri percorsi dal treno, e quindi anche dalla valvola, si è fatto ricorso ancora una volta al Sistema RSMS utilizzando la transazione *ZPERKM-Percorenze e Ore Funzionamento rotabili*. Inserita in alto a sinistra la transazione si apre una schermata che consente di selezionare la sede tecnica o rotabile desiderati e inserire le date di inizio e fine osservazione per ottenere i chilometri percorsi (vedesi **Figura 47**).

Utilizzata la transazione, è possibile implementare la tabella (vedesi **Figura 48**) che risulta essere il punto di partenza per poter poi iniziare ad applicare il metodo di Weibull.

Sede tecnica	Data inizio osservazione	Data di fine osservazione	Percorenza KM relativa al periodo selezionato
ETR425092	10/06/2022	18/07/2022	13955
ETR425101	11/01/2023	15/02/2023	14253
ETR425002	11/11/2022	15/02/2023	35291
ETR425115	17/10/2022	15/02/2023	45796
ETR425005	12/07/2022	15/02/2023	45884

Figura 48: Tabella percorenze chilometriche

Monitorato il tempo di funzionamento di ciascuna valvola installata sui rotabili, si è in grado di applicare il Metodo di Weibull ordinando le valvole in ordine crescente in relazione ai chilometri percorsi specificando il motivo di fine prova. La fine della prova può avvenire per due motivazioni: A) Si verifica la rottura della valvola e in quel caso si inserisce nell'apposito spazio "*Rottura*"; B) Si inserisce nell'apposito spazio "*Sospesa*" quando non si verifica nessuna rottura e la valvola viene pertanto sostituita per manutenzione programmata o quando, finito il tempo di osservazione, la valvola comunque è ancora funzionante.

Ad ogni riga della tabella, a cui naturalmente corrisponde una valvola, viene assegnato un numero progressivo crescente chiamato "*Rank*" e un numero progressivo decrescente (partendo dal numero totale delle valvole osservate) chiamato "*Rank Inverso*". Attraverso questi due numeri progressivi possiamo calcolarci l'*Adjusted rank*" indicato con "*i*" con la formula 38



$$i = AdjustedRank = \frac{(RankInverso)(AdjustedRankPrecedente) + (N + 1)}{(RankInverso - 1)} \quad (38)$$

Calcolato l' "Adjusted Rank" è possibile calcolare il "Median Rank" attraverso l'Approssimazione di Bernard, che consente di avere un valore approssimato della Funzione di Inaffidabilità F(t).

Successivamente si calcola il logaritmo naturale del tempo di funzionamento "t" e il logaritmo naturale di 1/(1-F(t)) (dove la F(t) è calcolata attraverso l'Approssimazione di Bernard). Il  $\ln[\frac{1}{1-F(t)}]$  potrebbe restituire valori negativi, in questo caso si può procedere in due modi: A) si lasciano i valori negativi e si *plottano* i punti ottenuti su un grafico (vedesi **Figura 49**); B) si sottrae il valore negativo più grande a tutta la colonna  $\ln[\frac{1}{1-F(t)}]$  e successivamente si *plottano* i punti sul grafico (vedesi **Figura 50**)

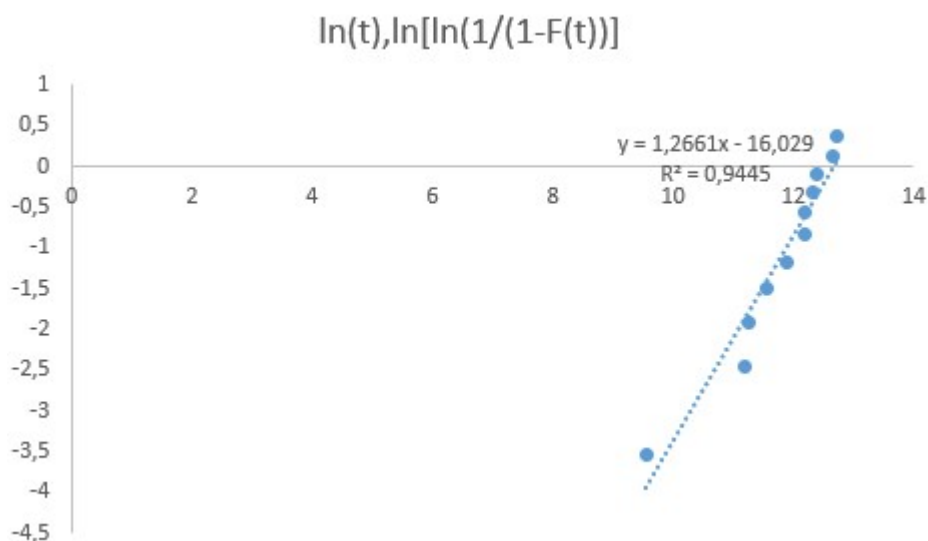


Figura 49: Grafico Weibull con valori negativi

Dopo aver inserito i punti nel grafico è possibile calcolare, attraverso una regressione lineare, la retta che meglio approssima la distribuzione di punti. Si può notare che nei due grafici si ottengono due rette con equazioni diverse aventi lo stesso coefficiente angolare, in realtà sono la stessa retta solo che la seconda è traslata verso l'alto rispetto alla prima. Naturalmente utilizzando uno o l'altro grafico si riesce con un opportuno accorgimento matematico, che verrà specificato in seguito, a ottenere lo stesso risultato.

Come spiegato nel capitolo dedicato, i parametri che ci interessano per il calcolo del tasso di guasto e del MTTF, sono il **parametro di forma o**

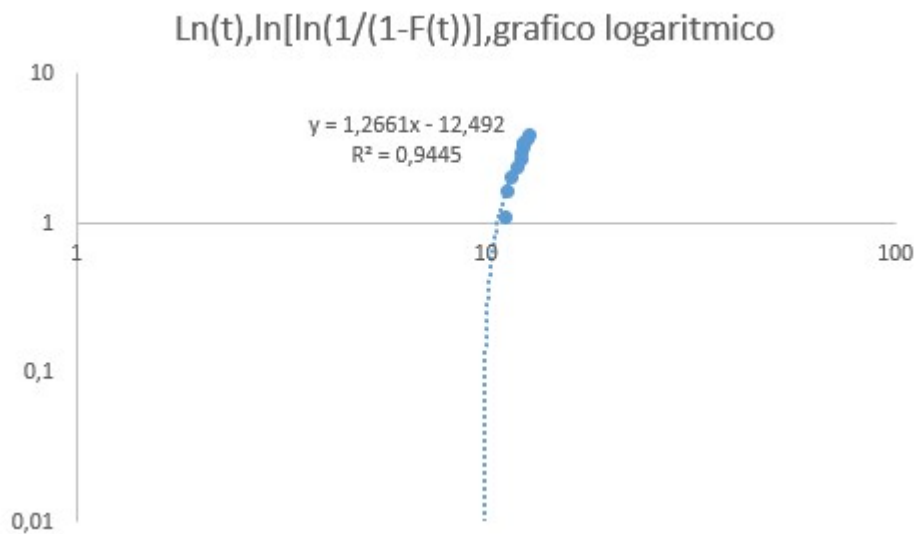


Figura 50: Grafico Weibull con valori positivi

scala  $\beta$  e il **parametro di vita**  $\eta$ . Il parametro  $\beta$  si ricava facilmente poiché è il coefficiente angolare della retta che si ottiene con la regressione lineare. Il parametro  $\eta$  si ottiene dall'equazione linearizzata (30), nello specifico si eguaglia il termine  $-\beta \ln(\eta)$  con il termine noto della retta ottenuta dalla regressione lineare.

Se si opta per l'utilizzo del metodo A) basta solamente invertire la relazione ed ottenere  $\eta$ . Nel caso del metodo B) si aggiunge al termine noto della retta il valore negativo più grande tolto alla colonna e si inverte la relazione. In entrambi i casi si ottiene lo stesso risultato, in particolare si è ottenuto  $\beta=1.2661$  e  $\eta=314940$ . Ora è possibile calcolare il **Mean Time To Failure** utilizzando la funzione  $\Gamma$ :

$$MTTF = \eta \Gamma \left[ 1 + \frac{1}{\beta} \right] \quad (39)$$

Dalla funzione risulta che il **Mean Time To Failure** è 292.492 chilometri.

Dopo aver ricavato i parametri  $\beta$  e  $\eta$  è possibile calcolare le funzioni di Affidabilità  $R(t)$ , Inaffidabilità  $F(t)$ , Densità di Probabilità  $f(t)$  e Tasso di Guasto  $\lambda(t)$  (vedesi **Figura 51**).

Le funzioni di Affidabilità  $R(t)$ , Inaffidabilità  $F(t)$ , Densità di Probabilità  $f(t)$  e Tasso di Guasto  $\lambda(t)$  sono state calcolate con la funzione di *Excel "DISTRIB.WEIBULL"* utilizzando  $\beta$  e  $\eta$  come argomenti e facendo variare  $t$  (tempo di funzionamento) con incremento progressivo di 50 chilometri.

t [Km percorsi]	Funzione densità di probabilità f(t)	Funzione di inaffidabilità F(t)	Funzione di affidabilità R(t)	Tasso di guasto $\lambda(t)$
50	3,91968E-07	1,54795E-05	0,999984521	3,91974E-07
100	4,71352E-07	3,72294E-05	0,999962771	4,7137E-07
150	5,2504E-07	6,22056E-05	0,999937794	5,25073E-07
200	5,66796E-07	8,95382E-05	0,999910462	5,66847E-07
250	6,01453E-07	0,000118768	0,999881232	6,01525E-07
300	6,31333E-07	0,000149604	0,999850396	6,31428E-07
350	6,57748E-07	0,000181844	0,999818156	6,57867E-07

Figura 51: Tabella per il calcolo delle funzioni

Plottando le relazioni in funzione del tempo di funzionamento t si ottengono i seguenti grafici:

- Funzione densità di probabilità f(t) (vedesi **Figura 52**):

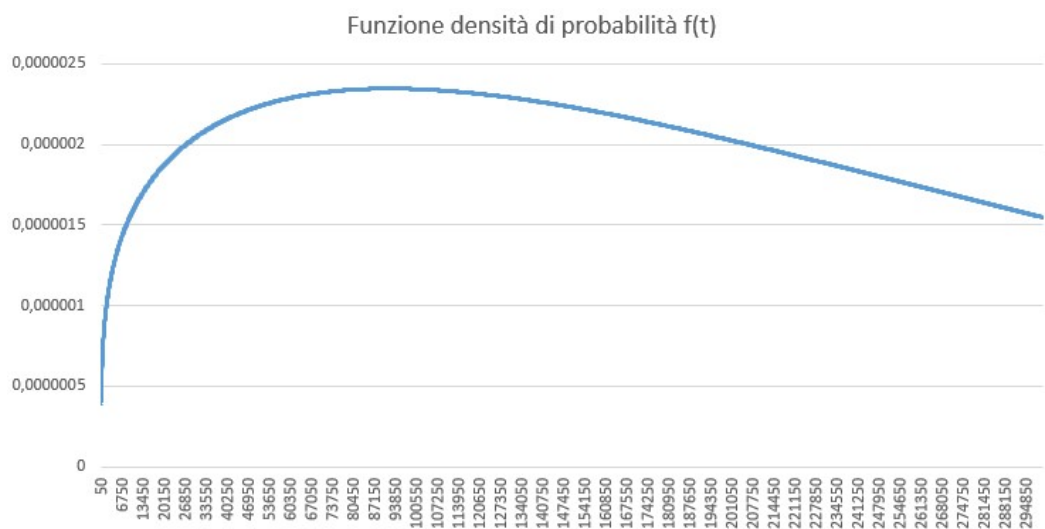


Figura 52: Grafico densità di probabilità

- Tasso di guasto  $\lambda(t)$  (vedesi **Figura 53**):
- Grafico della funzione di affidabilità R(t) e inaffidabilità F(t) (vedesi **Figura 54**):

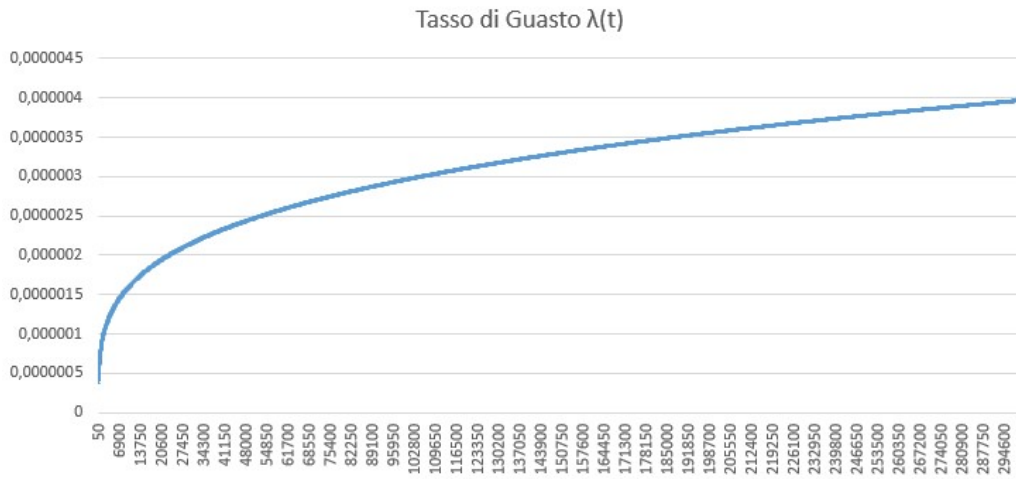


Figura 53: Grafico del tasso di guasto  $\lambda(t)$

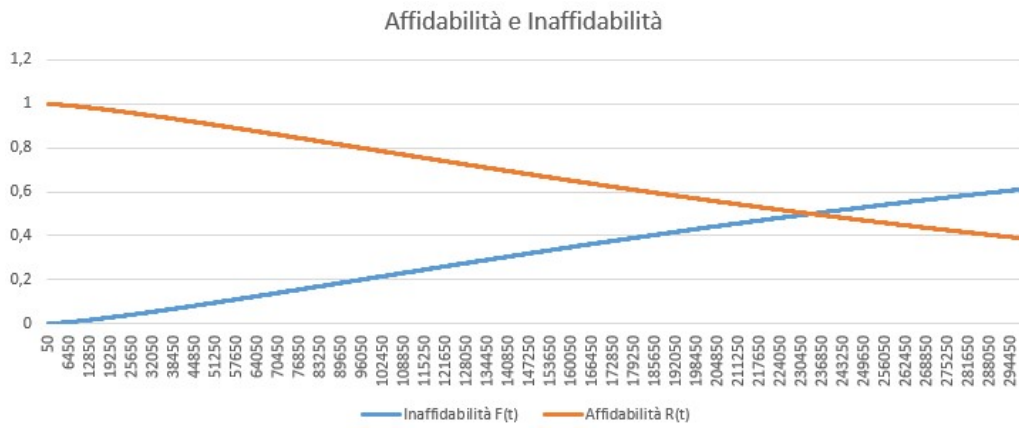


Figura 54: Andamento funzione di affidabilità  $R(t)$  e inaffidabilità  $F(t)$

## 6.5 Proposta di miglioramento e analisi economico-finanziaria

Lo scopo di questo studio, come precedentemente detto, è quello di individuare il componente critico per aumentare l'affidabilità della flotta e di conseguenza diminuire l'indisponibilità dei mezzi. Per poter fare questo è necessario cercare, tramite dati e risultati ottenuti, una soluzione mirata a migliorare la strategia manutentiva.

Dall'applicazione dell'analisi di Weibull sul componente è stato possibile ricavare le funzioni di affidabilità  $R(t)$  e inaffidabilità  $F(t)$ , utili a loro volta per ricavare i parametri  $\eta$  (caratteristica di vita) e  $\beta$  (parametro di scala) indispensabili per il calcolo del MTTF (*Main Time To Failure*).

Il MTTF o tempo medio di guasto risulta essere un valore estremamente importante per poter effettuare una proposta di modifica e miglioramento del Piano Manutentivo. Il suo valore è stato ottenuto dall'applicazione del metodo considerando le valvole che, nel periodo che va dal 15 febbraio 2020 al 15 febbraio 2023, sono state sostituite a causa di una rottura è di 292.492 chilometri.

JAZZ	Km
001	402120
002	355953
003	414070
004	410290
005	332254
006	402459
007	336342
008	305445
091	410724
092	396732
101	416332
113	432443
115	419894
Media	387312,2

$\beta$	1,2661
$\eta$	314940
MTTF	292492

Figura 55: Tabella Chilometri percorsi durante il periodo di osservazione

La manutenzione programmata sulla valvola a tagliola (cioè il componente preso in considerazione per tale analisi) viene effettuata con una cadenza di trentasei mesi come indicato nel Piano Manutentivo (vedesi **Figura 46**). Attraverso l'utilizzo del Sistema Informativo RSMS si sono monitorati i chilometri percorsi dai treni della flotta nei trentasei mesi (triennio) di osser-

vazione, facendo di nuovo ricorso alla transazione *ZPERKM-Percorrenze e ore funzionamento rotabile* (vedesi **Figura.47**), in modo da capire se il valore del MTTF è concorde con la scadenza programmata del Piano Manutentivo (trentasei mesi).

Dopo aver osservato le percorrenze di ciascun mezzo della flotta è stata calcolata la media per avere una percorrenza media della flotta effettuata in trentasei mesi, tale valore è pari a 387.312,2 chilometri

Come mostrato (vedesi **Figura 55**), il MTTF è inferiore alla percorrenza media di un treno della flotta, in particolare si ha che, se 387.500 chilometri (approssimati in eccesso) sono percorsi in trentasei mesi allora, in proporzione, 292.492 chilometri sono quelli percorsi in ventisette mesi.

Con il passaggio da chilometri a mesi si riesce ad evidenziare meglio come le valvole possano rompersi prima di raggiungere il periodo di sostituzione in manutenzione programmata. Questo tipo di guasto non genera un rientro immediato del treno ma, alla fine del suo turno, deve rientrare per sistemare il problema in quanto, quest'ultimo, genera un disservizio a bordo del mezzo che crea un impatto negativo sul comfort per i passeggeri e di conseguenza sull'immagine aziendale (difficile da quantificare come danno economico se non attraverso le curve di gradimento del cliente).

Il rientro del treno al termine del servizio, e quindi il suo fermo per la successiva riparazione, hanno dei costi quantificabili in costo della riparazione, in mancati ricavi e in una minore disponibilità del mezzo.

Il MTTF (*Mean Time To Failure*) è inferiore alla percorrenza media effettuata in tre anni da un treno della flotta. Nello specifico, corrisponde a 292.492 chilometri, che equivale a circa ventisette mesi. Pertanto, una possibile soluzione potrebbe essere quella di anticipare la manutenzione programmata a ventisette mesi anziché trentasei tenendo presente che, non essendo prevista dal Piano Manutentivo una finestra, bisogna tener conto dei costi di fermo treno. In alternativa, si potrebbe considerare di anticipare ancora prima la manutenzione sfruttando la finestra di manutenzione a ventiquattro mesi già prevista dal Piano Manutentivo per eseguire altre operazioni.

Per capire gli effetti di tale modifica si effettuerà un'analisi considerando opportune ipotesi per valutare il possibile aumento dell'affidabilità e il *trade-off* tra quest'ultimo e i costi.

### 6.5.1 Analisi economica

Per la valutazione della proposta dal punto di vista economico è stato utilizzato il costo di manutenzione correttiva e il costo di manutenzione programmata.

Il costo di manutenzione programmata è stato calcolato tenendo conto dei costi dovuti alla sostituzione del componente, del costo orario della manodopera e del tempo necessario per effettuare l'intervento. Per il costo della manodopera si è considerato un costo medio indicativo che tiene conto del costo orario del personale e delle infrastrutture utilizzate.

La formula utilizzata per il calcolo del costo di manutenzione programmata è la seguente (40):

$$CostoProgrammata = Cpezzo + (Cmano * MTTR) + Csoccorso \quad (40)$$

Il costo del soccorso si sostiene nel momento in cui il treno, che ha subito un guasto e si è fermato in linea durante il servizio, deve essere recuperato da un mezzo di soccorso che lo deve scortare in impianto per effettuare le riparazioni necessarie. Nello studio preso in considerazione questo costo è pari a zero poiché un guasto alla valvola non causa un danno tale da rendere non funzionante il treno e fermarlo sulla linea durante il servizio.

Nel caso in cui si sostituisca il componente durante una manutenzione programmata il costo di intervento è pari a 528,54€.

Per quanto riguarda la manutenzione correttiva, oltre ai costi citati prima, è stato considerato anche il costo del fermo rotabile. Il costo di fermo rotabile è calcolato attraverso somma di ulteriori tre costi:

- Costo fermo puro, dato a sua volta dalla somma del costo dell'utilizzo del bene (ammortamento medio giornaliero) e dal costo capitale investito che è calcolato sul mancato rendimento del capitale immobilizzato (**Figura 56**).

Fermo puro	AMM/G	REDD/G
1.530,00 €	793,00 €	737,00 €

Figura 56: Costo del fermo puro

- Penali per minori posti offerti, nel caso in cui il treno venga sostituito con un Minuetto che può offrire minori posti.
- Mancati ricavi: Nel caso in cui il treno sia sostituito con Minuetto (che può offrire meno posti), il mancato ricavo è determinato calcolando la differenza tra il ricavo generato dai posti offerti su un treno Jazz e il ricavo generato dai posti offerti su un treno Minuetto. Il ricavo generato dai posti offerti su base giornaliera è calcolato dividendo la

quota proporzionale di produzione tr\*km (treno-chilometro) per il totale dei posti annui offerti dalla flotta, e successivamente moltiplicata per i posti offerti giornalmente.

La formula utilizzata per il calcolo della manutenzione correttiva è la seguente:

$$CostoCorrettiva = Cpezzo + (Cmano * MTTR) + Cfermo + Csoccorso \quad (41)$$

Sede tecnica	Data inizio osservazione	Data di fine osservazione	KM relativa al periodo selezionat	Motivo fine prova
ETR425001	13/03/2020	15/02/2023	391853	Sospesa
ETR425002	11/11/2022	15/02/2023	30745	Sospesa
ETR425002	27/04/2022	11/11/2022	72296	Rottura
ETR425002	08/04/2020	27/04/2022	239324	Rottura
ETR425003	09/04/2020	15/02/2023	401360	Sospesa
ETR425004	16/02/2022	15/02/2023	140751	36 mesi
ETR425004	21/10/2020	16/02/2022	196039	Rottura
ETR425005	12/07/2022	15/02/2023	45884	Sospesa
ETR425005	04/04/2020	28/11/2020	76802	Rottura
ETR425005	28/11/2020	12/07/2022	197107	Rottura
ETR425006	19/08/2022	15/02/2023	69658	Sospesa
ETR425006	07/04/2020	19/08/2022	316683	Rottura
ETR425007	26/03/2020	18/06/2021	145314	Rottura
ETR425007	18/06/2021	15/02/2023	183200	Sospesa
ETR425008	27/10/2020	02/02/2023	222475	Rottura
ETR425091	13/06/2022	15/02/2023	92459	Sospesa
ETR425092	10/06/2022	18/07/2022	13955	Rottura
ETR425092	18/07/2022	15/02/2023	80605	Sospesa
ETR425101	11/01/2023	15/02/2023	14253	Sospesa
ETR425101	27/07/2022	11/01/2023	62939	36 mesi
ETR425101	13/02/2020	27/07/2022	339814	Rottura
ETR425113	17/11/2021	15/02/2023	178854	Sospesa
ETR425115	17/10/2022	15/02/2023	45796	Sospesa
ETR425115	26/01/2022	17/10/2022	103772	Rottura

Figura 57: Scenario con manutenzione della valvola ogni 36 mesi

Nel caso di utilizzo di una sostituzione del componente il costo della manutenzione è di 15.357,04 €.

Dopo aver identificato tutte le relazioni che descrivono i costi, è stata condotta un'analisi che considera tre scenari: lo scenario attuale (vedesi **Figura 57**), in cui la manutenzione sulla valvola viene eseguita ogni trentasei mesi;



Code tecnica	Data inizio osservazione	Data di fine osservazione	Motivo fine prova
ETR425001	13/03/2020	13/06/2022	27 mesi
ETR425001	13/06/2022	15/02/2023	Sospesa
ETR425002	08/04/2020	27/04/2022	Rottura
ETR425002	27/04/2022	08/07/2022	27 mesi
ETR425002	08/07/2022	15/02/2023	Sospesa
ETR425003	09/04/2020	09/07/2022	27 mesi
ETR425003	09/07/2022	15/02/2023	Sospesa
ETR425004	21/10/2020	16/02/2022	Rottura
ETR425004	16/02/2022	21/01/2023	27 mesi
ETR425004	21/01/2023	15/02/2023	Sospesa
ETR425005	04/04/2020	28/11/2020	Rottura
ETR425005	28/11/2020	04/07/2022	27 mesi
ETR425005	04/07/2022	15/02/2023	Sospesa
ETR425006	07/04/2020	07/07/2022	27 mesi
ETR425006	07/07/2022	15/02/2023	Sospesa
ETR425007	26/03/2020	18/06/2021	Rottura
ETR425007	18/06/2021	26/06/2022	27 mesi
ETR425007	26/06/2022	15/02/2023	Sospesa
ETR425008	27/10/2020	27/01/2023	27 mesi
ETR425008	27/01/2023	15/02/2023	Sospesa
ETR425091	13/06/2022	15/02/2023	Sospesa
ETR425092	10/06/2022	15/02/2023	Rottura
ETR425101	13/02/2020	13/05/2022	27 mesi
ETR425101	13/05/2022	15/02/2023	Sospesa
ETR425113	17/11/2021	15/02/2023	Sospesa
ETR425115	26/01/2022	17/10/2022	Rottura
ETR425115	17/10/2022	15/02/2023	Sospesa

Figura 58: Scenario con manutenzione della valvola ogni 27 mesi

e due scenari ipotetici, in cui nel primo caso la manutenzione viene eseguita ogni ventisette mesi senza sfruttare una finestra di manutenzione già prevista dal Piano, mentre nel secondo caso la manutenzione programmata viene effettuata ogni ventiquattro mesi, sfruttando la finestra di manutenzione già prevista dal Piano Manutentivo.

Durante il periodo di osservazione, nella situazione **attuale**, sono stati registrati undici interventi di manutenzione correttiva per un costo in euro:

$$CostoCorrettiva = 168.927,43$$

e solo due interventi di manutenzione programmata per un costo in euro:

$$CostoProgrammata = 1.057,08$$

per un totale di:

$$CostoTotale = 169.984,51$$

Nel primo **scenario ipotetico** (vedesi **Figura 58**), in cui viene effettuata una manutenzione sulla valvola ogni ventisette mesi, l'analisi considera l'ipotesi che le valvole che si sono rotte entro i primi sette mesi non siano state considerate. In questo scenario si verifica una diminuzione degli interventi correttivi e un aumento della manutenzione programmata, ma non essendo prevista una finestra di manutenzione bisogna comunque tener conto dei costi di fermo treno. In questa situazione si hanno sei interventi di manutenzione correttiva per un costo di :

$$CostoCorrettiva = 92.142,19$$

e nove interventi di manutenzione programmata per:

$$CostoProgrammata = 138.213,35$$

In totale si ha:

$$CostoTotale = 230.355,58$$

Considerando l'ipotesi che non si abbiano rotture prima di sette mesi, si può

	$\Delta$ (delta)
$\Delta$ valvole manutenzione programmata	7
$\Delta$ valvole manutenzione correttiva	-5
$\Delta$ costo correttiva	-76.785,19 €
$\Delta$ costo programmata	137.156,27 €
$\Delta$ costo totale	60.371,08 €

Figura 59: Tabella degli scostamenti tra realtà e primo scenario ipotetico

osservare che, sostituendo la valvola ogni ventisette mesi, si riesce ad aumentare il numero delle valvole sostituite nella manutenzione programmata, ed inoltre si riesce quasi a dimezzare il numero di interventi correttivi. Dal punto di vista economico (vedesi **Figura 59**) si ha una diminuzione dei costi della manutenzione correttiva grazie alla minore probabilità di guasti improvvisi ma, allo stesso tempo, si ha un elevato aumento dei costi di manutenzione programmata poiché, non essendo prevista una finestra di manutenzione, si deve tenere conto del costo di fermo treno.

Questo porta ad un aumento dei costi della manutenzione di 60.371,08 euro.

Nel secondo **scenario ipotetico** (vedesi **Figura 60**), in cui viene effettuata una manutenzione sulla valvola ogni ventiquattro mesi, ancora una volta l'analisi considera l'ipotesi che le valvole che si sono rotte entro i primi sette mesi non siano state considerate.

Sede tecnica	Data inizio osservazione	Data di fine osservazione	Percorrenza KM relativa al periodo selezionato	Motivo fine prova
ETR425001	13/03/2020	13/03/2022	262568	24 mesi
ETR425001	13/03/2022	15/02/2023	129285	Sospesa
ETR425002	08/04/2020	08/04/2022	231922	24 mesi
ETR425002	08/04/2022	11/11/2022	79432	Rottura
ETR425002	11/11/2022	15/02/2023	30398	Sospesa
ETR425003	09/04/2020	09/04/2022	284842	24 mesi
ETR425003	09/04/2022	15/02/2023	116945	Sospesa
ETR425004	21/10/2022	15/02/2023	48260	Sospesa
ETR425004	21/10/2020	16/02/2022	196039	Rottura
ETR425004	16/02/2022	21/10/2022	92700	24 mesi
ETR425005	04/04/2022	15/02/2023	84533	Sospesa
ETR425005	04/04/2020	28/11/2020	76802	Rottura
ETR425005	28/11/2020	04/04/2022	156923	24 mesi
ETR425006	07/04/2020	07/04/2022	264963	24 mesi
ETR425006	07/04/2022	15/02/2023	121624	Sospesa
ETR425007	26/03/2020	18/06/2021	145314	Rottura
ETR425007	18/06/2021	26/03/2022	106038	24 mesi
ETR425007	26/03/2022	15/02/2023	77162	Sospesa
ETR425008	27/10/2020	27/10/2022	182355	24 mesi
ETR425008	27/10/2022	15/02/2023	44009	Sospesa
ETR425091	13/06/2022	15/02/2023	92459	Sospesa
ETR425092	10/06/2022	15/02/2023	94108	Sospesa
ETR425101	13/02/2020	13/02/2022	273218	24 mesi
ETR425101	13/02/2022	15/02/2023	143471	Sospesa
ETR425113	17/11/2021	15/02/2023	178854	Sospesa
ETR425115	17/10/2022	15/02/2023	45796	Sospesa
ETR425115	26/01/2022	17/10/2022	103772	Rottura

Figura 60: Scenario con manutenzione della valvola ogni 24 mesi

In questo scenario si verifica una diminuzione degli interventi correttivi e un aumento della manutenzione programmata, in particolare si hanno cinque interventi di manutenzione correttiva per un costo di:

$$CostoCorrettiva = 76.785,19$$

e nove interventi di manutenzione correttiva per:

$$CostoProgrammata = 4.756,86$$

In totale si ha:

$$CostoTotale = 81.542,05$$

Considerando l'ipotesi indicata, si può osservare che, sostituendo la valvola ogni ventiquattro mesi, diminuiscono i costi di manutenzione correttiva di

	$\Delta$ (delta)
$\Delta$ valvole manutenzione programmata	7
$\Delta$ valvole manutenzione correttiva	-6
$\Delta$ costo correttiva	-92.142,23 €
$\Delta$ costo programmata	3.699,78 €
$\Delta$ costo totale	-88.442,45 €

Figura 61: Tabella degli scostamenti tra realtà e secondo scenario ipotetico

più della metà, grazie alla minore probabilità di guasti improvvisi che richiedono costosi interventi di riparazione. Inoltre, si può notare un leggero aumento dei costi di manutenzione programmata, ma questi costi sono comunque insignificanti rispetto al costo totale, poiché la manutenzione programmata è meno costosa sfruttando la finestra manutentiva prevista della manutenzione correttiva favorendo il mantenimento dell'impianto in condizioni di funzionamento ottimali.

Come mostrato (vedesi **Figura 61**) grazie alle ipotesi considerate, è evidente che si potrebbe ridurre il numero di valvole sostituite a causa di guasti improvvisi, riducendo di conseguenza gli interventi di manutenzione correttiva e conseguentemente i costi ad essi associati.

Allo stesso tempo, si verificherebbe un aumento dei costi dovuto all'aumento di interventi di manutenzione programmata. Complessivamente, tuttavia, si otterrebbe un notevole risparmio di costi pari a 88.442,45€ nell'arco di tre anni, grazie alla riduzione delle riparazioni d'emergenza e all'implementazione di una maggiore manutenzione programmata.

Come è stato mostrato, la sostituzione a ventiquattro mesi sembra essere la soluzione migliore sia dal punto di vista della maggior affidabilità dovuta al minor numero di rotture, sia dal punto di vista economico. Infatti, il secondo scenario consente un maggiore risparmio, mentre il primo scenario ha un aumento dei costi per la mancanza di una finestra manutentiva prevista.

### 6.5.2 Analisi finanziaria

Nella valutazione della proposta dal punto di vista finanziario, sono stati presi in considerazione tutti i materiali sostituiti sulla flotta, raggruppati in macro-categorie, e si è considerato il loro impatto sulla scorta di treni necessaria per garantire il servizio.

Attraverso la proposta di miglioramento che prevede la sostituzione della valvola ogni ventiquattro mesi, l'obiettivo è ridurre la scorta necessaria dei treni per garantire il servizio. Tuttavia, poiché questa analisi viene condotta

Impianti	N di parti per impianto	ETR425001	ETR425002
Porte	96	6	7
Freno	142	19	16
Toilet	113	19	14
Circuiti BT	173	17	13
STB	135	18	3
Batterie	31	0	10
Antincendio	59	4	0
Attrezzi di corredo	51	2	6
Parabrezza,Cristalli	27	1	1
Convertitore di Trazione	22	6	2
Olio,Guarnizioni,Filtri	53	3	10
Arredi	79	12	4
Illuminazione	26	3	3
Pantografo	25	4	2
Convertitore Ausiliario	10	1	2
Compressore	44	0	0
Climatizzazione	19	6	0
Trazione	5	0	0
Accoppiatore automatico	5	0	0
Carrello	23	8	1
Circuiti AT	4	1	1
Impianto pneumatico	17	0	0
Cassa	1	0	0

Figura 62: Tabella dei materiali utilizzati suddivisi per macro-categorie e treno

dopo l'investimento, il risultato può essere interpretato come un recupero di un treno, ma anche come un aumento dell'efficienza complessiva.

Per condurre questa analisi, abbiamo preso in considerazione tutti i materiali utilizzati durante un periodo di tre anni per la manutenzione della flotta. In particolare, abbiamo suddiviso inizialmente i materiali in macro-categorie per ciascun treno (vedesi **Figura 62**) e successivamente le abbiamo raggruppate insieme (vedesi **Figura 63**).

La flotta JAZZ, come già menzionato in precedenza, è composta da tredici treni, ciascuno con un costo approssimativo di circa 6.300.000 €. Di questi, il 20% viene considerato come riserva da utilizzare in caso di prolungate operazioni di manutenzione o guasti improvvisi. Pertanto, due treni JAZZ sono designati come treni di riserva. In termini monetari, il valore della scorta ammonta a 12.600.000 €.

Come mostrato nella tabella (vedesi **Figura 63**), sono stati calcolati i pesi

Impianti	N di parti per impianto	Peso%
Porte	96	9,83%
Freno	142	14,53%
Toilet	113	11,57%
Circuiti BT	173	17,71%
STB	135	13,82%
Batterie	31	3,17%
Antincendio	59	6,04%
Parabrezza,Cristalli	27	2,76%
Convertitore di Trazione	22	2,25%
Illuminazione	26	2,66%
Pantografo	25	2,56%
Convertitore Ausiliario	10	1,02%
Compressore	44	4,50%
Climatizzazione	19	1,94%
Trazione	5	0,51%
Accoppiatore automatico	5	0,51%
Carrello	23	2,35%
Circuiti AT	4	0,41%
Impianto pneumatico	17	1,74%
Cassa	1	0,10%
	977	100,00%

Figura 63: Tabella macro-categorie materiali

percentuali per determinare l'impatto di ciascuna macro-categoria o impianto sulla disponibilità della riserva.

Prima di calcolare i pesi, sono state escluse alcune macro-categorie, come "Arredi" e "Attrezzi di corredo" che non contenevano materiali di importanza tale da causare l'immobilizzazione di un treno. Inoltre, la macro-categoria "Olio, Guarnizioni, Filtri" è stata esclusa poiché contiene materiali accessori necessari per effettuare la manutenzione.

La tabella (vedesi **Figura 63**) evidenzia che per la manutenzione dell'impianto "Toilet" sono stati impiegati 113 materiali, rappresentanti il 11,57% del peso totale. Tuttavia, poiché la maggior parte di questi materiali è destinata al montaggio e alla manutenzione di altri componenti legati alla Toilet o sono componenti che hanno un basso costo, possiamo ipotizzare che il peso sia attribuibile interamente alle valvole. Pertanto, il peso delle undici valvole corrisponde al 11,57% .

Le valvole, come accennato in precedenza, sono responsabili di inconvenienti per gli utenti e, di conseguenza, richiedono l'immobilizzazione del treno per la manutenzione non appena il servizio è terminato. In termini monetari,

le valvole hanno un peso di 1.457.820 € ogni tre anni(vedesi **Figura 64**).

Flotta jazz	13
Vita Utile (anni)	24
Quota jazz scorta	20%
Jazz di scorta	2
Costo Jazz	6.300.000,00 €
Costo scorta Jazz	12.600.000,00 €
Peso	11,57
Peso della toilet sulla scorta	1.457.820,00 €
Valvole sostituite	11

Figura 64: Tabella impatto scorte 36 mesi

Implementando una politica di manutenzione preventiva ogni ventiquattro mesi e tenendo conto del fatto che durante le manutenzioni a trentasei mesi non si sono mai verificate rotture prima dei sette mesi, possiamo presupporre che anche in questa nuova configurazione non si verificheranno rotture prima di tale periodo. In questo modo, come visto prima, si ha una proiezione di sole 5 valvole guaste.

In questo caso, si è risparmiato su 6 valvole sostituite, riducendo così il numero totale di materiali utilizzati per la manutenzione dell'impianto "Toilet" a 107. Tuttavia, poiché la maggior parte dei materiali è impiegata per la manutenzione e l'assemblaggio di altri componenti correlati alla "Toilet", si attribuisce l'intero peso alle valvole.

Con l'utilizzo di una proporzione, possiamo calcolare il peso corrispondente in questa situazione. Ad esempio, se 11 valvole sostituite durante la manutenzione a trentasei mesi corrispondono a un peso del 11,57% del totale, allora 5 valvole rappresenterebbero il 5,26% del peso complessivo .

Flotta jazz	13
Vita Utile (anni)	24
Quota jazz scorta	20%
Jazz di scorta	2,6
Costo Jazz	6.300.000,00 €
Costo scorta Jazz	12.600.000,00 €
Peso	5,26
Peso della toilet sulla scorta	662.760,00 €
Valvole sostituite	5

Figura 65: Tabella impatto scorte 24 mesi

In termini monetari il peso delle valvole corrisponde a 662.760€ (vedesi **Figura 65**), pertanto con questa soluzione, rispetto alla situazione reale, si riesce a risparmiare 795.060 € in tre anni, cioè 265.020 € ogni anno.

Tale valore di risparmio risulta paragonabile al costo di acquisto di un Jazz se spalmato sulla vita utile stimata (6.300.000 € /24 anni= 262.500 €/anno). In termini operativi il risparmio economico si traduce in una maggiore disponibilità della flotta (riduzione di un treno di scorta di pari valore economico) da impiegare per aumentare l'offerta di treni\*km destinati al servizio commerciale (circa 120.000 tr\*km/anno).

### 6.5.3 Applicazione delle reti neurali

Utilizzando un *software* di rete neurale si vuole realizzare un primo prototipo di modello che consente, a partire dai dati utilizzati per la Teoria di Weibull, di predire il valore del MTTF (*Main Time To Failure*).

Percorrenza KM relativa al periodo selezionato	Motivo fine prova	Rank	Rank inverso	"I" Adjusted Rank	Median Rank F(t)	median Rank %	ln[ln(1/(1-F))]	ln(t)	col-(-3,53674)
13955	Rottura	1	24	1	0,028689	2,868852	-3,53674	9,543593	0
72296	Rottura	8	17	2,333333	0,083333	8,333333	-2,44172	11,18852	1,095023
76802	Rottura	9	16	3,666667	0,137978	13,79781	-1,90734	11,24899	1,629398
103772	Rottura	12	13	5,190476	0,200429	20,04294	-1,49754	11,54995	2,039202
145314	Rottura	14	11	6,84127	0,268089	26,80848	-1,16446	11,88665	2,372278
196039	Rottura	17	8	8,858907	0,350779	35,07749	-0,83939	12,18607	2,697353
197107	Rottura	18	7	10,87654	0,433469	43,34649	-0,56525	12,1915	2,971486
222475	Rottura	19	6	12,89418	0,516159	51,61549	-0,32022	12,31257	3,216521
239324	Rottura	20	5	14,91182	0,598849	59,88449	-0,09057	12,38557	3,446166
316683	Rottura	21	4	16,92949	0,681539	68,1539	0,134743	12,66566	3,671482
339814	Rottura	22	3	18,94709	0,764229	76,4229	0,368024	12,73619	3,904764

Figura 66: Foglio contenenti i dati per l'addestramento

Il modello di regressione realizzato attraverso il *software* **GMDH Shell DS** ci permette, dopo averlo addestrato con il paradigma di apprendimento **supervisionato**, di ottenere in modo indiretto il MTTF.

Lo si ottiene in modo indiretto perché le tecniche di apprendimento supervisionato addestrano modelli con set di dati (*training set*) aventi per ciascun ingresso la relativa uscita, mentre in questo caso da una serie di dati di ingresso vogliamo ottenere un solo valore. Per questo motivo invece di predire



direttamente il MTTF si cerca di ottenere un modello che predica le  $y$  del grafico di Weibull dando in ingresso alcune variabili tra cui le  $x$ .

Ottenendo le  $y$  si può ricostruire la retta da cui si calcola il MTTF.

Per addestrare la rete neurale bisogna prima di tutto realizzare un file *Excel* che deve essere formattato o ordinato in modo tale che ad ogni ingresso corrisponda un'uscita. Ottenuto quindi il file contenente i dati delle valvole utilizzati per la Teoria di Weibull vengono tutte le valvole che hanno avuto "sospesa" come "motivo di fine prova", ottenendo un data set come quello in figura (vedesi **Figura 66**). A questo punto si è realizzato un nuovo modello e si è andati a selezionare il file creato prima; fatto ciò, si apre una finestra che permette di scegliere il tipo di modello che si vuole realizzare e, in conclusione, il modello scelto è quello di regressione (vedesi **Figura 67**).

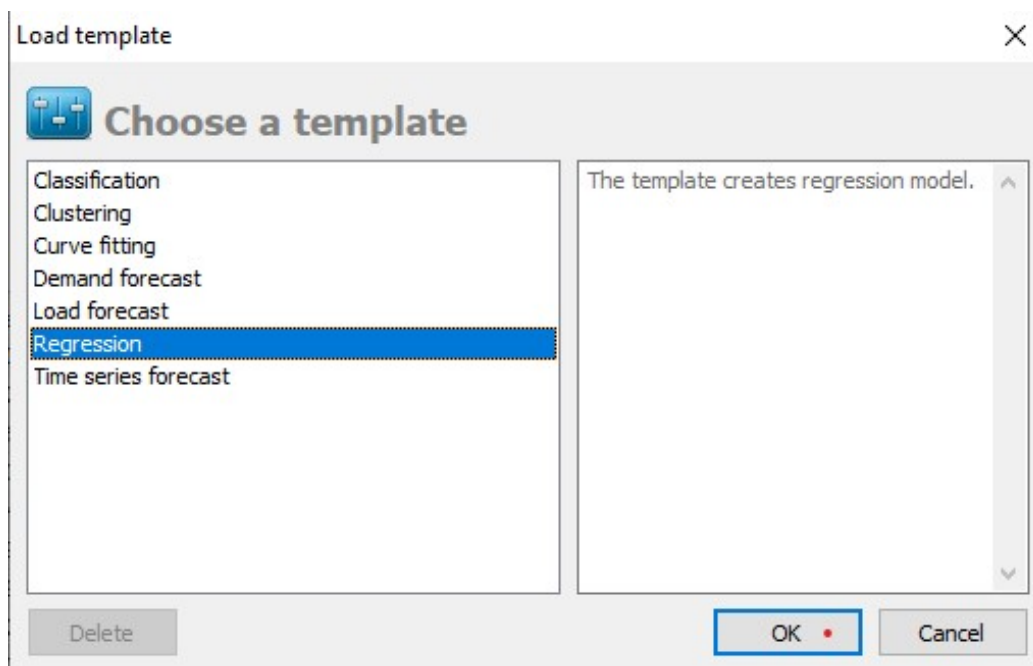


Figura 67: Finestra di selezione del modello

Dopo aver scelto il modello, il programma domanda quale colonna del file si intende predire e successivamente quale sono le colonne che si vogliono dare in *input*. In questo caso, come spiegato in precedenza, per ricavare indirettamente il MTTF si selezionano come valori da predire il " $\ln[\ln(1/(1-F))]$ " (cioè le  $y$  della retta) e come valori di *input* si indica la "percorrenza chilometrica", il " $\ln(t)$ " e il "Rank".

Dopo aver eseguito ciò, il programma chiede quanta percentuale dei dati deve utilizzare per validare il modello. Non avendo moltissimi dati a disposizione si è scelto di selezionare il 20% dei dati per la validazione.

A questo punto il file elabora e restituisce una tabella (vedesi **Figura 68**) e un grafico (vedesi **Figura 69**).

#	ID	Actual	Predictions	Residuals
6	7	-0,565253	-0,565253	-1,63203E-14
7	8	-0,320218	-0,320218	-2,20934E-14
8	9	-0,0905734	-0,0905734	-2,74503E-14
9	10	0,134743	0,134743	-3,25295E-14
10	6	-0,839386	-0,839386	-1,0103E-14
11	11	0,368024	0,368024	-3,80251E-14

Figura 68: Tabella di valori restituiti dalla rete

Nella tabella ci vengono mostrati i valori "attuali" cioè i valori in uscita che volevamo fossero predetti, i valori "predetti" e cioè quei valori che effettivamente sono stati predetti dal modello e il residuo, ovvero l'errore che c'è tra il valore "attuale" e quello "predetto".

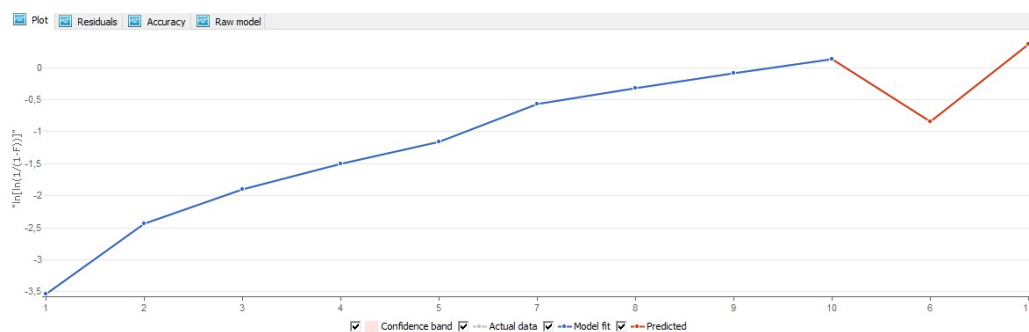


Figura 69: Grafico restituito dalla rete neurale

Al fine di testare le reti neurali, il procedimento è stato ripetuto più volte utilizzando il Metodo "*Cross Validation (Leave one out)*". Questo metodo consente di generare modelli utilizzando distinti insiemi di dati chiamati "Training set", ottenuti da un set di dati iniziale in cui, volta per volta, viene escluso un singolo dato. Attraverso questo metodo è stato possibile generare venticinque modelli diversi. Dopo la creazione di ciascun modello, è stato eseguito un test utilizzando l'insieme di dati originale. I risultati sono stati esportati in un file *Excel* e i valori sono stati rappresentati su un grafico. Da tutta questa analisi è emerso che le linee ottenute erano molto simili alla retta originale ottenuta utilizzando il metodo di Weibull.

Da ogni retta si può ottenere  $\beta$  (coefficiente angolare della retta) e  $\eta$  (invertendo il termine noto), in questo modo è possibile calcolarsi il MTTF.

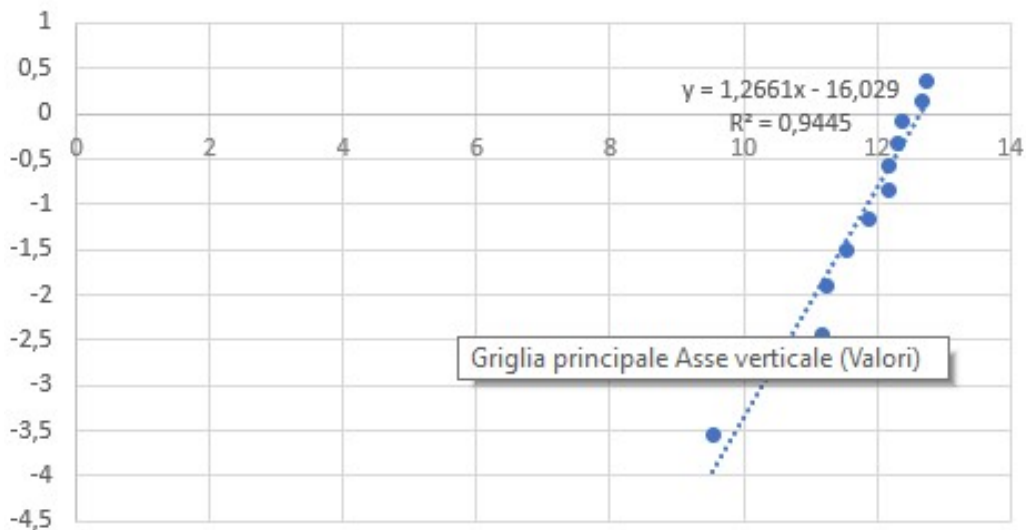


Figura 70: Grafico di Weibull ottenuto con i dati predetti dalla rete

Dai risultati ottenuti, si può vedere come emergano una retta e quindi un valore MTTF (*Mean Time To Failure*) leggermente diverso rispetto alla Teoria di Weibull. Tuttavia, in due casi specifici, il valore ottenuto coincide con quello previsto utilizzando la Teoria di Weibull (vedesi **Figura 70**).

I valori MTTF ottenuti sono stati successivamente inseriti in un nuovo file *Excel*, e da essi è stato calcolato un valore medio di MTTF pari a 283.506 chilometri. Questo valore differisce dal valore calcolato utilizzando il metodo di Weibull di 9.766 chilometri. Una differenza che comunque è accettabile considerando i pochi dati a disposizione per addestrarlo.

Sicuramente dei possibili aggiornamenti o modifiche di questo modello realizzato con le reti neurali potrebbero essere:

- addestrare il modello utilizzando un numero maggiore di dati, ma stando comunque attenti a non finire nella situazione di *overfitting* (cioè il modello è così legato al *dataset* da non riuscire a generalizzare i risultati).
- addestrare il modello considerando più variabili determinanti.

Questo modello, anche se in una fase embrionale, può essere considerato un primo tentativo di implementare analisi orientate ad uno sviluppo e un utilizzo più complesso dei dati da parte di Trenitalia S.p.A per predire il MTTF di un qualsiasi componente e generare così delle politiche manutentive adeguate che permettano di limitare al minimo i periodi di fermo treno e garantire ai propri clienti un servizio maggiormente efficiente.

## 7 Conclusioni

L'obiettivo di questo lavoro è stato individuare i componenti critici della flotta Jazz di Trenitalia S.p.A e applicare su di essi un modello matematico. Tale modello mira a promuovere una modifica nel Piano di Manutenzione, al fine di generare risparmi, migliorare l'affidabilità e aumentare la disponibilità dei mezzi sia per Trenitalia S.p.A che per i suoi clienti.

Durante l'analisi, è emerso che il componente critico identificato è la valvola a tagliola del bagno. Nel momento in cui la valvola si guasta, pur non verificandosi un'interruzione immediata del servizio del treno, ciò nonostante, al termine della corsa, è necessario richiamare il treno per effettuare le riparazioni previste. Questa situazione causa comunque un disagio ai clienti, in particolare durante i viaggi di lunga durata, poiché c'è solo un bagno disponibile sul treno.

Il componente preso in esame è stato analizzato utilizzando il modello di Weibull al fine di determinare l'intervallo ottimale per la sua sostituzione, calcolando il *Mean Time To Failure* (MTTF). I risultati hanno indicato che il MTTF di questi componenti era di 292.492 chilometri, corrispondenti a circa ventisette mesi. Tuttavia, nel Piano di Manutenzione attuale, la sostituzione di tali valvole è programmata ogni trentasei mesi.

Successivamente, sono stati sviluppati degli scenari basati su opportune ipotesi derivanti dall'analisi della situazione attuale. È emerso che, effettuando la sostituzione della valvola a tagliola del bagno ogni ventiquattro mesi, si può ottenere un numero inferiore di interventi correttivi. In particolare, si è passati da 11 guasti rilevati con una frequenza di sostituzione di trentasei mesi a soli 5 guasti, traducibili in un significativo aumento dell'affidabilità dei componenti critici.

Inoltre, riducendo il numero di interventi di manutenzione correttiva, si ottiene una conseguente diminuzione dei costi ad essa associati. Tuttavia, è importante notare che i costi di manutenzione programmata aumentano, anche se rimangono trascurabili rispetto al risparmio complessivo ottenuto. Complessivamente, è stato possibile ottenere un risparmio di 88.442,45 euro.

La decisione di sostituire la valvola a tagliola del bagno ogni ventiquattro mesi è stata presa in considerazione poiché rientra nella finestra di manutenzione già prevista dal Piano di Manutenzione per eseguire altre operazioni sul treno. Ciò consente di evitare il costo di fermare il treno specificamente per questa sostituzione ottimizzando così l'utilizzo del tempo e delle risorse di manutenzione disponibili.

Inoltre, è emerso che i guasti alle valvole hanno un impatto significativo sulla scorta di treni necessari per coprire il servizio. Attualmente, il 20% della flotta, corrispondente a due treni su tredici, viene considerato come scorta,

da utilizzare quando un treno si ferma per riparazioni improvvise. Le valvole sono l'unico componente del bagno che si guasta frequentemente e che causa l'arresto del treno per le riparazioni necessarie. Sostituendo le valvole ogni ventiquattro mesi, si riduce il peso di queste sostituzioni sulla scorta dei treni, generando un risparmio di 265.000 euro all'anno. Tale valore di risparmio risulta paragonabile al costo di acquisto di un Jazz se spalmato sulla vita utile stimata ( $6.300.000 \text{ €} / 24 \text{ anni} = 262.500 \text{ €}/\text{anno}$ ). Pertanto, risulta essere rilevante eseguire analisi di questo tipo sui componenti maggiormente critici andando a delineare azioni di intervento preventivo, perché in termini operativi il risparmio economico si traduce in una maggiore disponibilità della flotta (riduzione di un treno di scorta di pari valore economico) da impiegare per aumentare l'offerta di treni\*km destinati al servizio commerciale (circa 120.000 tr\*km/anno).

Successivamente, è stato sviluppato un primo modello di rete neurale per digitalizzare il modello di Weibull al fine di ottenere uno strumento che permetta di calcolare immediatamente il MTTF senza dover eseguire l'intera procedura di Weibull.

Questo modello, come detto in precedenza, è in una fase prototipale, ma è comunque un primo tentativo verso analisi più complesse e dettagliate di cui Trenitalia S.p.A può disporre per predire il MTTF di altri componenti. Tale modello predittivo può essere utilizzato ad esempio in altre direzioni regionali che fanno utilizzo dei Jazz con una frequentazione di passeggeri maggiore, per calcolare il MTTF della valvola.

Tali risultati però non vanno visti solo come un vantaggio economico, ma soprattutto come un aumento dell'affidabilità e della disponibilità dei mezzi e di conseguenza un aumento della soddisfazione dei passeggeri che ne fanno uso.

## 8 Ringraziamenti

Desidero dedicare uno spazio speciale per esprimere la mia profonda gratitudine a tutte le persone che mi hanno sostenuto lungo questo cammino di crescita personale.

Desidero innanzitutto esprimere i miei più sinceri ringraziamenti al mio relatore, il professore Archimede Forcellese, e al mio correlatore, l'ingegner Carmine Dazj, per i loro preziosi consigli, e il loro contributo e supporto nel mio percorso di scrittura della tesi.

Desidero esprimere la mia più sincera gratitudine all'azienda che mi ha ospitato, Trenitalia S.p.A., e a tutti i dipendenti della direzione regionale Marche che hanno contribuito al mio percorso professionale. In particolare, vorrei ringraziare il direttore Fausto Del Rosso, l'ingegner Chiara Di Michele, mia tutor, nonché il capoimpianto, per il loro sostegno costante e prezioso durante il mio periodo di lavoro. Un ringraziamento speciale va anche ai miei stimati colleghi di ufficio, Nicola Bastianelli, Cristian Manzotti, Francesco Pannocchia, Francesco Barucca e Fabrizio Belardinelli, per la loro disponibilità nel fornirmi le informazioni necessarie e per il clima di collaborazione che hanno creato.

Sono profondamente grato per l'opportunità di crescita professionale che mi è stata offerta da Trenitalia S.p.A. e per il contributo di ciascuna persona coinvolta nel mio percorso lavorativo.

Desidero dedicare un sentito ringraziamento a tutti i miei amici, coloro che sono stati al mio fianco da sempre e quelli che ho conosciuto lungo il percorso universitario. La loro presenza è stata fondamentale nel sostenermi e incoraggiarmi durante la mia crescita personale. Condividere con loro momenti di gioia, sfide e successi è stato un privilegio e una fonte di grande ispirazione. La loro amicizia sincera e il supporto costante mi hanno dato forza e fiducia nel perseguire i miei obiettivi. A ciascuno di loro va il mio più profondo riconoscimento per aver reso il mio cammino universitario un'esperienza indimenticabile e per aver contribuito in modo significativo alla mia crescita come persona.

Infine, ma non meno importante, desidero esprimere un profondo ringraziamento ai miei genitori e alla mia famiglia. La loro presenza, i loro incoraggiamenti e il supporto morale sono stati fondamentali per superare le sfide e raggiungere i miei obiettivi.

## Riferimenti bibliografici

- [1] Abernethy R.B., *The New Weibull Handbook. Reliability and Statistical Analysis for Predicting Life, Safety, Risk, Support Costs, Failures, and Forecasting Warranty Claims, Substantiation and Accelerated Testing, Using Weibull, Log Normal, Crow-AMSA, Probit, and Kaplan-Meier Models (5th Edition)*, Editor Dr. Robert B. Abernethy, 1993, Florida, 1993.
- [2] Agnoli A., *Sistema Telediagnostica. Prevenzione guasti, tele-diagnostici e controllo continuo dello stato di un rotabile*, «MAM.Manutenzione And Asset Management», (maggio 2016). In <https://www.manutenzione-online.com/articolo/sistema-telediagnostica/#:~:text=Il%20sistema%20Telediagnostica%2C%20sviluppato%20da,di%20bordo%20installati%20sui%20rotabili>.
- [3] Baldin A., *Manutenzione, progettazione e fabbricazione di macchine*, in «Ingegneria meccanica», 7/8 (1981), 652 - 672.
- [4] Baldin A., *La manutenzione secondo condizione delle trasmissioni meccaniche*, in «Rivista di meccanica», 2/773 (1982), pp. 109 – 124.
- [5] Cervelli R., *Reti neurali artificiali: quando l'IT si ispira al cervello biologico*, in «Network Digital 360», (novembre 2021). In <https://www.zerounoweb.it/analytics/cognitive-computing/reti-neurali-artificiali-quando-lit-si-ispira-al-cervello-biologico/>
- [6] Cinalli E., *Appunti di tecnologie e tecniche di installazione e manutenzione*, (febbraio 2016).
- [7] Mainsim CMMS Academy, *Tipi di manutenzione*, in «Mainsim what the maintenance can be». In <https://www.mainsim.com/academy/tipi-di-manutenzione/>
- [8] Mainsim CMMS Academy, *Manutenzione preventiva*, in «Mainsim what the maintenance can be». In <https://www.mainsim.com/academy/manutenzione-preventiva/>
- [9] Mainsim CMMS Academy, *Manutenzione su condizione*, in «Mainsim what the maintenance can be». In <https://www.mainsim.com/academy/manutenzione-su-condizione/>
- [10] Mainsim CMMS Academy, *Manutenzione predittiva*, in «Mainsim what the maintenance can be». In <https://www.mainsim.com/academy/manutenzione-predittiva/>



- [11] Mainsim CMMS Academy, *Manutenzione correttiva*, in «Mainsim what the maintenance can be». In <https://www.mainsim.com/academy/manutenzione-correttiva/>
- [12] Mainsim CMMS Academy, *Manutenzione migliorativa*, in «Mainsim what the maintenance can be». In <https://www.mainsim.com/academy/manutenzione-migliorativa/>
- [13] Principe E., *Filosofia e Politica della manutenzione. Evoluzione della manutenzione e sua importanza tecnico-economica all'interno delle realtà produttive* in «La Tecnica Professionale», 12/2 (Febbraio 1998), pp. 12 – 21.
- [14] Tavani S., *Affidabilità e Manutenzione*, in «Trasporti Industriali», 280 (giugno 1982), p. 209
- [15] Trenitalia S.p.A, *ALSTOM - Automotrice ETR425/ETR324. Manuale per il personale di bordo addetto alla condotta Volume PBC-01A. Caratteristiche e Descrizione*, (Dicembre 2019).
- [16] Trenitalia S.p.A, *ALSTOM - ETR 425 - ETR 324. Piano di manutenzione di 1° livello*, (Marzo 2021)
- [17] Trenitalia S.p.A, *Descrizione Impianti di Servizio (Modello standard RailNetEurope – RNE)*, 2021-2022. In [https://www.fseonline.it/\\$/resource/1611930951000/DescrizioneimpiantidiServizioFSE](https://www.fseonline.it/$/resource/1611930951000/DescrizioneimpiantidiServizioFSE).
- [18] Trenitalia S.p.A, *La tecnologia di diagnostica "a distanza" applicata alla gestione della manutenzione dinamica e predittiva (Dynamic Maintenance Management System)*. In <https://www.fsitaliane.it/content/fsitaliane/it/innovazione/ingegneria-e-digitalizzazione.html>
- [19] AA. vv., *Mantenzione: Tutte le definizioni delle norme di riferimento* (febbraio 2023). In <https://www.certifico.com/normazione/173-documenti-riservati-normazione/documenti-estratti-norme/3135-manutenzione-tutte-le-definizioni-delle-norme-~:text=Attitudine%20di%20una%20entit%C3%A0%2C%20in,procedure%20e%20le%20risorse%20prescritte>.