



UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA

DIPARTIMENTO DI TECNICA E GESTIONE DEI SISTEMI INDUSTRIALI

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria dell'Innovazione del Prodotto

MANUTENZIONE PREVENTIVA FERROVIARIA IN ASSENZA DI DATI A ROTTURA:
APPLICAZIONE AL CASO SISTEMI TERRITORIALI S.p.A.

Preventive Railway Maintenance With Censored Failure Data: Case Study On Sistemi Territoriali S.p.A.

Relatore: Ch.mo Prof. FABIO SGARBOSSA

Laureando: VALERIO TERTAN

Anno Accademico 2015-2016

*Alla mia famiglia,
ai miei amici,
ai miei colleghi.*

INDICE

CAPITOLO 1. SISTEMI TERRRITORIALI S.p.A.	1
1.1 Storia:.....	1
1.2 Divisione Ferroviaria di Sistemi Territoriali S.p.A.	2
1.2.1 Organizzazione Interna	2
1.2.2 Attività Ferroviarie.....	6
1.2.3 Linee di Servizio:	7
1.3 Organico a Disposizione:.....	8
1.4 Materiale Rotabile e Infrastruttura Ferroviaria.....	9
1.4.1 Materiale Rotabile per Servizi Passeggeri:	14
1.4.2 Materiale Rotabile per Servizi Merci:.....	18
CAPITOLO 2. La Manutenzione	21
2.1 LA MANUTENZIONE IN GENERALE.....	21
2.1.1 Introduzione	21
2.1.2 Teoria della manutenzione: la gestione delle macchine.....	26
2.1.3 Affidabilità	28
2.1.4 Elementi di Affidabilità nel continuo.....	31
2.1.5 Disponibilità	33
2.1.6 Il tasso di guasto e la curva di mortalità.....	35
2.1.7 I sistemi complessi	38
2.1.8 Affidabilità dei sistemi in serie	39
2.1.9 Affidabilità dei sistemi in parallelo	40
2.1.10 Disponibilità dei sistemi complessi.....	43
2.1.11 La manutenibilità.....	44
2.2 STRATEGIE MANUTENTIVE	46
2.2.1 La strategia della manutenzione.....	46
2.2.2 I tempi della manutenzione	48
2.2.3 Le politiche manutentive	50

2.2.4	La manutenzione correttiva.....	52
2.2.5	La manutenzione preventiva	53
2.2.6	Manutenzione su condizione.....	54
2.2.7	La manutenzione predittiva.....	57
2.2.8	La manutenzione produttiva: Total Productive Maintenance (TPM)	58
2.2.9	La pianificazione degli interventi	60
2.3	LA MANUTENZIONE DEI ROTABILI	62
2.3.1	Considerazioni generali.....	62
2.3.2	Tempo e fatica.....	63
2.3.3	Criteri di riparazione del materiale rotabile	64
2.3.4	Il sistema di manutenzione preventiva in ambito ferroviario	65
2.3.5	Il problema dell'entità e distanziamento delle riparazioni cicliche	68
2.3.6	Pianificazione, coordinamento generale del lavoro e programmi di riparazione ...	70
2.3.7	Gli impianti di riparazione	72
2.3.8	L'organizzazione del lavoro negli impianti riparatori	74
2.3.9	La pulizia del materiale rotabile.....	76
2.4	ANALISI DI WEIBULL.....	77
2.4.1	Introduzione alla stima della legge di affidabilità.....	77
2.4.2	Definizione e significato dei parametri caratteristici della distribuzione di Weibull	79
CAPITOLO 3. Manutenzione preventiva in assenza di dati.....		85
3.1	$UEC(t_p)$ Type I: Age-Based Replacement Policy.....	86
3.2	$UEC(t_p)$ Type II: Constant-Interval Replacement Policy	86
3.3	Definizione dei costi di preventiva C_p e costi di guasto C_f	87
3.4	Equazioni dei Costi Unitari Attesi $UEC(t_p)$	89
3.5	Calcolo dell' $UEC(t_p)$ minimo.....	92
3.6	Teoria per il calcolo dell'MTTF in assenza di dati	94
3.6.1	Andamento degli $UEC(t_p)$	94
3.6.2	Metodo iterativo di calcolo dell'MTTF in assenza di dati.....	102
3.6.3	Calcolo dei β e θ sulla base dell'MTTF di primo tentativo	104

3.6.4	Stima valori di UEC(t_p)	107
CAPITOLO 4. Caso Studio: Manutenzione Preventiva in Sistemi Territoriali S.p.A.....		113
4.1	Introduzione.....	113
4.2	GTW 2/6 (ATR 110/116) e GTW 4/12 (ATR 120/126)	113
4.2.1	Specifiche Tecniche	113
4.2.2	Architettura delle casse	118
4.2.3	Architettura della testa del veicolo.....	119
4.2.4	Architettura del modulo di trazione	119
4.2.5	Foto complessive di cassa, testate e modulo di trazione	120
4.2.6	Aggancio Frontale SHAKU e SCHARFENBERG.....	121
4.2.7	Articolazione delle carrozze.....	124
4.2.8	Carrelli.....	126
4.2.9	Trasmissione dello sforzo di trazione/frenatura	131
4.2.10	Struttura degli assi motori	132
4.2.11	Trazione.....	134
4.2.12	Unità di trazione	134
4.2.13	Impianto di raffreddamento motori diesel.....	137
4.2.14	Motore Diesel – Generatrice elettrica	138
4.2.15	Convertitore di trazione.....	144
4.2.16	Motori di trazione.....	147
4.2.17	Equipaggiamenti ausiliari 400 Vcc	150
4.2.18	Sistema di controllo.....	150
4.2.19	Gruppo generazione aria	153
4.2.20	Compressore.....	156
4.2.21	Impianto essiccazione aria	158
4.2.22	Filtro aria compressa	161
4.2.23	Sistema frenante	162
4.2.24	Sistema ungiabordo.....	168
4.2.25	Sospensione pneumatica	169
4.2.26	Sabbiere.....	169
4.2.27	Antipattinamento.....	170
4.3	Stato attuale di manutenzione.....	172

4.4	Principali guasti riscontrati.....	174
4.5	Analisi di manutenzione preventiva per i convertitori IGBT.....	175
4.6	Analisi di manutenzione preventiva per valvola freno pneumatica	189
4.7	Analisi di manutenzione preventiva per le camicie motore MAN.....	198
CONCLUSIONI.....		205
BIBLIOGRAFIA		209

INTRODUZIONE

Questo lavoro di tesi nasce qualche anno fa, più precisamente nel Novembre del 2013, quando venni contattato dal Gruppo Ferrovie dello Stato per propormi uno studio basato sul piano manutentivo di alcune tipologie di carri merci di Trenitalia Cargo. Iniziai così un percorso di formazione alternato tra l'IMC di Verona Porta Nuova e l'IMC di Cervignago del Friuli dove, accompagnato dall'impeccabile preparazione tecnica dell'Ing. Angelo Mattioli e Corrado Biscaro, mi vennero spiegate e mostrate le principali tecniche manutentive per i carri merci che avrei dovuto analizzare al fine di creare un modello manutentivo simile a quello attualmente utilizzato per le locomotive elettriche.

Qualche mese dopo, nel Gennaio del 2014, ci fu però una svolta: a mia sorpresa venni chiamato per esser assunto come macchinista presso un'impresa ferroviaria della regione Veneto cui feci concorso qualche anno prima, ovvero, Sistemi Territoriali S.p.A.

Allettato dall'offerta di lavoro accettai l'incarico ma, al contempo, mi venne negata la possibilità di continuare quanto iniziato con Trenitalia data la mia imminente assunzione presso un'impresa ferroviaria di concorrenza.

Non volendo desistere, pur con diverse difficoltà legate ai turni di lavoro, ho voluto fare tesoro dell'esperienza che accumulavo giorno dopo giorno con la figura professionale che stavo ricoprendo ed è per questo motivo che ho deciso di convertire e mie ricerche in qualcosa di molto simile e che risultasse compatibile con quanto già iniziato in Trenitalia.

Decidemmo quindi con l'aiuto del carissimo prof. Fabio Sgarbossa (mio relatore per questa tesi) di spostare l'attenzione sui mezzi che attualmente conduco sulle linee ferroviarie di competenza a Sistemi Territoriali S.p.A. di modo da sfruttare a pieno tutti i ritorni di esperienza che accadono quotidianamente in servizio.

Tutto questo non sarebbe stato possibile senza l'aiuto dei due capi officina della stazione di Piove di Sacco Maurizio Pinato e Franco Stigliano oltre che ai miei due istruttori Nicola Fabris e Giacomo Baruzzo e a tutta la squadra manutentiva per le informazioni che hanno saputo rivelarmi durante le mie ricerche.

La struttura di questo lavoro di tesi viene suddivisa in quattro distinte macro sezioni di cui viene fornita qui al seguito una breve descrizione:

Capitolo 1. *Sistemi Territoriali S.p.A.*

Nel corso del primo capitolo l'attenzione sarà concentrata sull'Azienda, in particolar modo sulla sua divisione ferroviaria e sulle risorse che la stessa ha a disposizione.

Questo capitolo consente quindi di avere un quadro generale di come è tipicamente organizzata un'impresa ferroviaria; in questo modo si riesce ad affinare al meglio lo studio della manutenzione attualmente applicata ai mezzi tramite valutazione preliminare delle risorse umane in servizio, del materiale rotabile a disposizione e degli impianti di servizio presso i quali svolgere le diverse operazioni manutentive.

Capitolo 2. *La Manutenzione*

Nel secondo capitolo si affronta il tema della manutenzione che, in un primo momento, verrà trattata a livello generale per poi addentrarsi nelle strategie manutentive oltre che, alla manutenzione dei rotabili per poi concludersi con l'analisi di Weibull. Nel dettaglio abbiamo che, per le politiche di manutenzione, si cercherà di mettere in luce che cosa siano, di cosa si occupano e perché oggi siano fondamentali nella gestione della manutenzione. Per quanto riguarda le principali strategie manutentive si anticipa che la trattazione è centrata sulla manutenzione di tipo correttivo, preventivo, su condizione e predittiva. Per il materiale rotabile ci si avvale degli appunti forniti su cortesia dell'Ing. Angelo Mattioli, mentre per l'analisi di Weibull avremo la base della teoria che verrà utilizzata per sviluppare lo studio che si andrà a trattare nei capitoli successivi.

Capitolo 3. *Manutenzione preventiva in assenza di dati*

Qui si entra nella teoria sviluppata in questo studio; si parte anzitutto dalla definizione dei costi unitari attesi $UEC(t_p)$ che, essendo fortemente dipendenti dalla strategia manutentiva utilizzata, presentano equazione strettamente legata alle fonti di costo. Tali costi vengono esplicitati sia per il caso in cui si adotti un'azione preventiva, sia per quella correttiva (a guasto). A conclusione della trattazione si specificherà quindi il metodo che è stato elaborato durante questa ricerca per definire l' $MTTF$ che minimizzi i costi.

Capitolo 4. *Caso Studio: Manutenzione preventiva in Sistemi Territoriali S.p.A.*

Per dar maggior significato a quanto sviluppato dalla teoria del capitolo 3 si prendono in analisi tre differenti componenti cui sono state riscontrate particolari problematiche in caso di guasto durante l'esercizio. Tali componenti vengono suddivisi per tipologia (elettrico, pneumatico e meccanico) e appartengono tutti ad una ben precisa famiglia di rotabili in uso a Sistemi Territoriali S.p.A. (automotrici Stadler GTW). L'analisi andrà pertanto a valutare il costo per l'applicazione di una manutenzione preventiva in assenza di dati poiché, attualmente, le manutenzioni vengono effettuate da una squadra manutentiva esterna inviata dal costruttore. La decisione di tale analisi è basata dalla volontà dell'Azienda di valutare la possibilità di effettuare tali manutenzioni con personale proprio.

CAPITOLO 1. SISTEMI TERRITORIALI S.p.A.



Figura 1.1 - Logo Sistemi Territoriali S.p.A.

1.1 Storia:

Sistemi Territoriali S.p.A. è una società a partecipazione pubblica che, nata con denominazione “Idrovie S.p.A.”, è stata costituita nel 1983 con lo scopo di progettare, costruire e gestire, in regime di concessione, le infrastrutture idroviarie connesse alla realizzazione di un sistema integrato di navigazione interno alla regione Veneto.

Dal 1 Aprile 2002 è subentrata alla società Ferrovie Venete S.r.l. nella gestione di alcune reti ferroviarie regionali e nei servizi di trasporto su tali linee, acquisendo licenza di Impresa Ferroviaria n. 19 dal Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, nonché il Certificato di Sicurezza n. 48/2004, rilasciato dalla Rete Ferroviaria Italiana S.p.A. (RFI S.p.A.) sia per il trasporto passeggeri che per il trasporto merci.

La Ferrovia Adria-Mestre, che fece parte del gruppo della “ex Veneta”, fu aperta all’esercizio ferroviario dapprima con la tratta Piove di Sacco-Adria (1916) e successivamente con la tratta Piove di Sacco-Venezia Mestre (1931), ed è attualmente l’unica linea ferroviaria della “ex Veneta” in servizio nella Regione Veneto.

Piove di Sacco, stazione centrale della linea, fu per lungo periodo anche stazione di diramazione della linea Piove di Sacco-Padova della tranvia a vapore extraurbana, successivamente elettrificata nel 1913 con un sistema di alimentazione a tensione monofase soppressa dopo 41 anni di servizio. Analogamente la stazione di Oriago era diramazione della linea tranviaria che, percorrendo la riviera del Brenta, collegava la città di Padova con Fusina.

Durante la seconda guerra mondiale la ferrovia non fu esente, come del resto tutte le altre linee del gruppo, dal subire gravi danneggiamenti alle strutture ed al materiale rotabile a seguito dei bombardamenti.

Al termine delle ostilità iniziarono i lavori di ricostruzione, ed il servizio riprese ufficialmente nel Settembre del 1945, con la comparsa delle prime automotrici MAN.

Da allora l'azienda ha vissuto vari passaggi societari, con la progressiva riduzione del gruppo di Ferrovie, e dal 1 Aprile 2002 è stata acquisita da Sistemi Territoriali S.p.A., il cui azionista di maggioranza è la Regione Veneto.

Successivamente nel corso di questo lavoro verrà presentata una cronistoria precisa e dettagliata per meglio comprendere l'evoluzione storica, ed il conseguente impatto sociale, della linea ferroviaria Adria-Mestre e della Società di gestione, contestualizzandola nel territorio di competenza.

1.2 Divisione Ferroviaria di Sistemi Territoriali S.p.A.

1.2.1 Organizzazione Interna

Sistemi Territoriali S.p.A. si compone di tre divisioni autonome:

- **Divisione Ferroviaria:** Sistemi Territoriali S.p.A. gestisce, per conto della Regione Veneto, la ferrovia Adria-Mestre con licenza di impresa Ferroviaria n. 19, rilasciata dal Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, e Certificato di Sicurezza numero 48 del 2004 rilasciato da RFI S.p.A.

Sulla linea Adria-Mestre Sistemi Territoriali S.p.A. effettua sia il servizio passeggeri, prolungato fino alla stazione di Venezia Santa Lucia, sia il servizio merci, con Mestre Porto Marghera stazione capotronco per il servizio di trasporto merci, sia ordinarie che pericolose.

Grazie ad un accordo con Trenitalia S.p.A., la Società ha ricevuto in affidamento la totalità dei treni passeggeri circolanti sulla ferrovia Rovigo-Chioggia e sulla direttrice Rovigo-Verona Porta Nuova via Legnago.

Altri accordi con Trenitalia S.p.A. prevedono inoltre la concessione di effettuare alcuni treni merci circolanti in Veneto e Friuli Venezia Giulia che verranno esposte in seguito.

- **Divisione Navigazione Interna:** questa divisione si occupa della gestione della linea navigabile Mantova-Venezia, destinata principalmente alla navigazione commerciale; la linea si snoda sull'idrovia Fiesso-Tartaro-Canalbianco per l'accesso diretto all'Adriatico, da cui si dirama l'idrovia Po-Brondolo per l'accesso alla laguna di Venezia.

La linea Mantova-Venezia offre un'ampia scelta di soluzioni di navigazione ai diportisti nel cuore della pianura padana, per giungere poi al mar Adriatico e alla laguna veneziana.

- Divisione Informatica e Gestione Banche Dati:** la divisione informatica si occupa della gestione delle procedure del rilascio di contrassegni d'identificazione per natanti da diporto a motore con potenza superiore ai 7,36 kW e circolanti nella laguna veneta, nonché della gestione del call center reclami ferroviari.

Sistemi Territoriali S.p.A., da Febbraio 2003, su incarico della Regione Veneto, ha realizzato e gestisce una banca dati dei Contrassegni di Identificazione dei natanti da diporto che permette il rilascio, in tempo reale, delle targhe necessarie per la navigazione nella Laguna Veneta, siano essi rilasciati in forma provvisoria oppure in forma definitiva.

La suddivisione interna di Sistemi Territoriali S.p.A. è rappresentata qui a seguito:

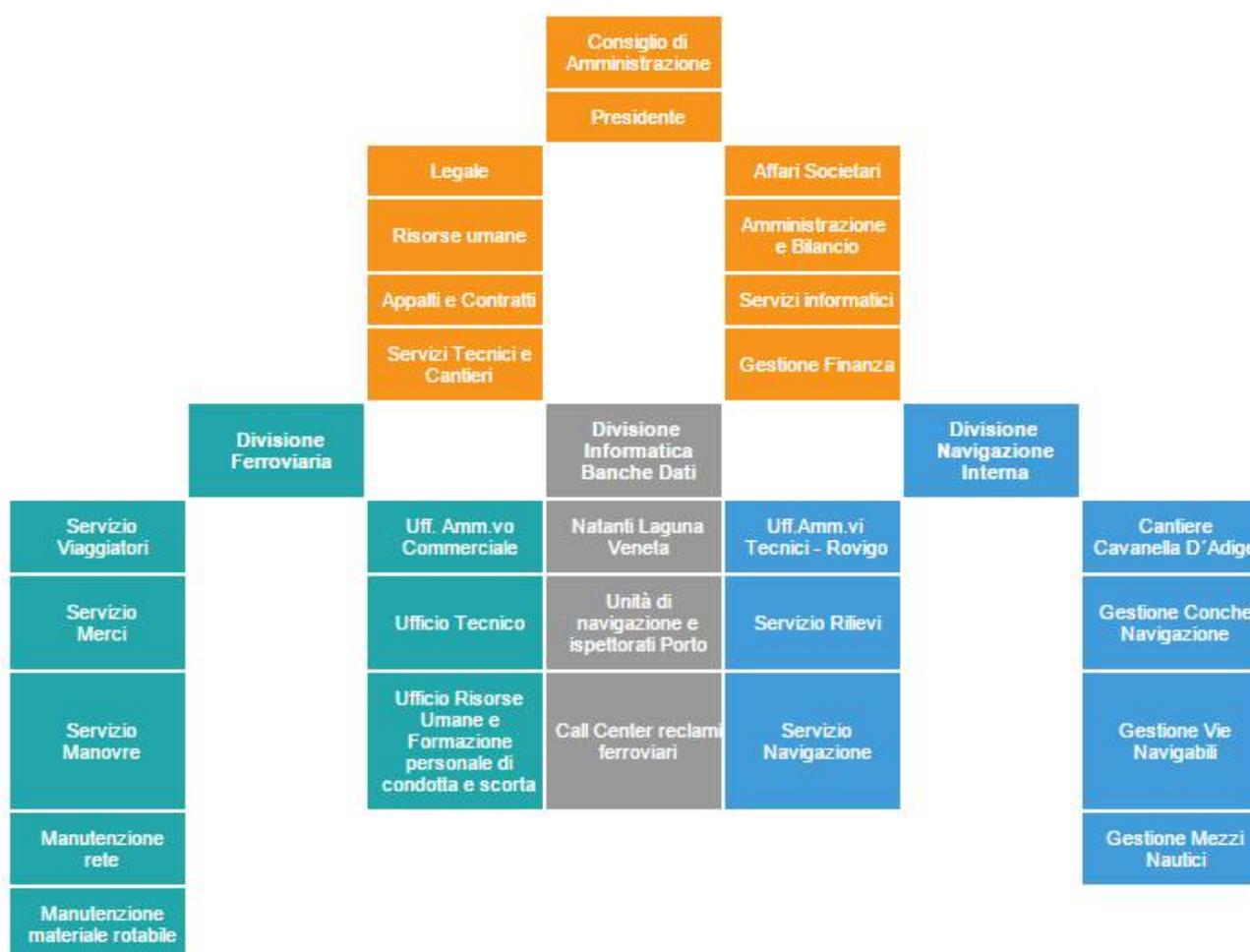


Figura 1.2.1 - Organizzazione interna Sistemi Territoriali S.p.A.

Gli azionisti di Sistemi Territoriali S.p.A. sono:

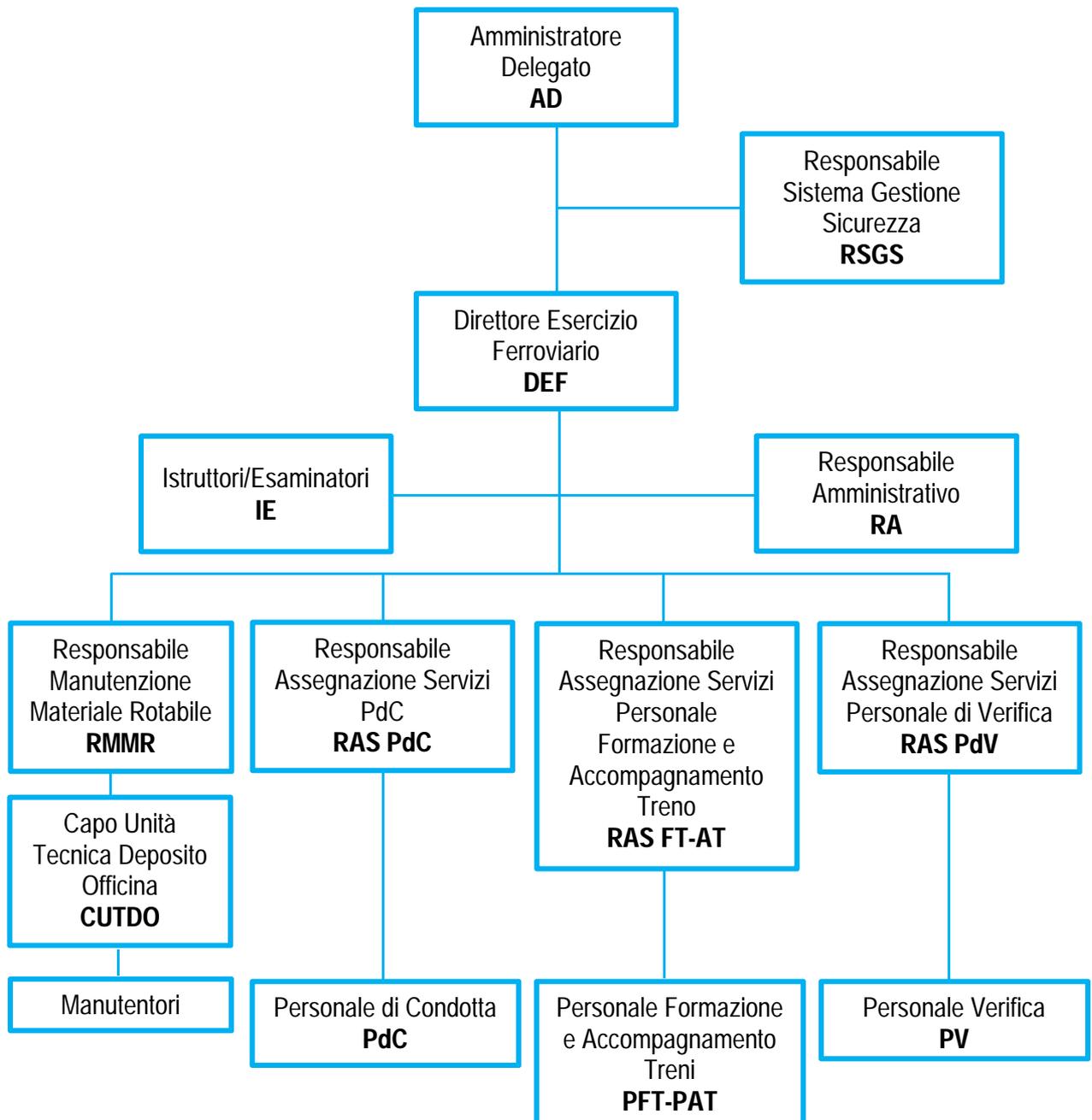
- Regione del Veneto per il tramite Veneto Sviluppo S.p.A. per il 99,83%;
- Sistemi Territoriali S.p.A. (azioni proprie) con quota 0,17%.

Le partecipazioni in Società sono invece:

- Ferroviaria Servizi S.r.l. – Società di servizi sia tecnici che amministrativi nonché esercente attività di manovre ferroviarie (Società controllata con partecipazione al 100%);
- Nord Est Logistica S.r.l. – Società costituita allo scopo di realizzare due distinti magazzini logistici nell'area dell'interporto di Venezia Porto Marghera (Società controllata con quota di partecipazione del 60%);
- Veneto Logistica S.r.l. – Società costituita allo scopo di realizzare due magazzini logistici nell'area dell'interporto di Rovigo (Società controllata con quota di partecipazione pari al 56,64%);
- Interporto di Rovigo S.p.A. (Società con quota di partecipazione del 4,30%);
- Portogruaro Interporto S.p.A. (altra Società con quota di partecipazione pari allo 0,484%).

Nel corso dell'analisi in questione ci si concentrerà esclusivamente sulla Divisione Ferroviaria (Manutenzione materiale rotabile) della Società, con sede in Viale degli Alpini, 23 di Piove di Sacco (PD).

Qui di seguito si riporta pertanto il relativo organigramma della Divisione Ferroviaria:



1.2.2 Attività Ferroviarie

La Società Sistemi Territoriali S.p.A. effettua molteplici servizi di trasporto ferroviario, tra cui:

- **Servizio Viaggiatori Locale:** trasporto pubblico locale nel territorio regionale Veneto con contratto di servizio emanato dalla regione stessa, la cui manovra e formazione dei treni viene effettuata presso l'impianto di Piove di Sacco;
- **Servizio Viaggiatori in Service:** trasporto pubblico locale nel territorio regionale Veneto per conto dell'impresa ferroviaria Trenitalia S.p.A. che vede impiegati mezzi proprietari di Sistemi Territoriali S.p.A. e mezzi in prestito da Trenitalia S.p.A. per il trasporto di pendolari lungo la tratta Rovigo-Verona P.N. (via Legnago) e Rovigo-Chioggia.
- **Servizio Trasporto Merci:** viene offerto il servizio lungo quasi tutto il territorio Veneto con sedi di partenza nella stazione di Rovigo (Tratte Rovigo-Rovigo Interporto, Rovigo-Cavanella Po, Rovigo-Polesella, Rovigo-Villa Opicina) e interporto di Venezia Porto Marghera.
- **Servizio di Manovra e Formazione:** treni merci e passeggeri per conto Trenitalia S.p.A. nelle sedi di deposito di Venezia Mestre e Treviso.

Per lo svolgimento dei suddetti servizi, Sistemi Territoriali S.p.A. assicura e mette a disposizione tutte le risorse umane necessarie, ovvero:

- **Personale di Condotta PdC (Macchinisti o Agenti di Condotta):** è la figura professionale chiave dell'intero sistema a cui viene assegnato il compito di condurre i mezzi di trazione nel massimo rispetto dei regolamenti, delle macchine e dell'impianti stessi;
- **Operatori di Manovra:** personale di terra che gestisce, programma e coordina le operazioni di movimentazione del materiale rotabile all'interno della stazione o dell'impianto di appartenenza;
- **Personale di Formazione e Accompagnamento Treno PFT e PAT (Capitreno e Operatori di Manovra):** Nel caso della formazione treno coauditano il macchinista durante le fasi di aggancio-sgancio della locomotiva al materiale rimorchiato e si occupano di effettuare tutte le opportune verifiche di efficienza degli organi di frenatura del convoglio, oltre che, nel servizio passeggeri, al controllo dei titoli di viaggio e sorveglianza dei clienti a bordo treno.

- Personale di Verifica (Macchinisti o Operatori di Manovra abilitati alla verifica): coaudiovano il 1° macchinista a svolgere la prova di efficienza degli organi frenanti del materiale rimorchiato.

Nello svolgimento di tutte le attività collegate ai servizi operativi della Divisione Ferroviaria di Sistemi Territoriali S.p.A., la Società si occupa delle attività di formazione e aggiornamento del personale tutto, ottemperando ai doveri previsti dalle normative europee, nazionali e locali vigenti in materia di **trasporto ferroviario**, sia per quanto riguarda il servizio viaggiatori, sia nell'ambito del trasporto merci ordinarie.

Per meglio inquadrare il contesto in cui opera Sistemi Territoriali S.p.A. si trova opportuno introdurre brevemente anche il meccanismo operativo dell'intero sistema ferroviario italiano: Ferrovie dello Stato S.p.A. è la società capogruppo che detiene le partecipazioni di altre numerose società, costituite appositamente per favorire la gestione delle distinte aree strategiche di interesse per l'azienda stessa soprattutto per il continuo miglioramento del servizio offerto all'utenza finale ovvero viaggiatori e aziende.

1.2.3 Linee di Servizio:

Qui di seguito vengono elencate, e suddivise per tipologia, le linee ferroviarie sulle quali viene effettuato regolare servizio da parte di Sistemi Territoriali S.p.A.:

<i>LINEA</i>	<i>MATERIALE ROTABILE</i>
<i>Rovigo – Adria – Chioggia</i>	Aln 663, Aln 668, ATR 110 e 116
<i>Rovigo – Legnago – Verona P.N.</i>	Aln 663, Aln 668, ATR 110 e 116
<i>Rovigo – Legnago – Monselice – Padova</i>	Aln 663, Aln 668, ATR 110 e 116

Tabella 1.2.3.1 – Linee ferroviarie di servizio

1.3 Organico a Disposizione:

Sistemi Territoriali S.p.A. si avvale di personale assunto per le specifiche mansioni, e può contare su un organico che si differenzia per sede di servizio e incarichi assegnati:

IMPIEGO	LUOGO	UNITÀ
<i>Attività di ufficio</i>	Piove di Sacco	8 Impiegati
<i>Personale di stazione e scorta</i>	Piove di Sacco	2 Coordinatori
		1 Coordinatore
		1 Assistente Coordinatore
		5 Capi stazione
		7 Capi Treno
		10 Capi Treno
		18 Capi Treno
		2 Capi Squadra Op. Manovra
<i>Personale di stazione e scorta</i>	IMC Ve. Mestre	1 Capo Squadra Op. Manovra
		17 Operatori di Manovra
	IFT Treviso	12 Operatori di Manovra
<i>Attività di officina</i>	Piove di Sacco	2 Capi Unità Tecnica
		1 Capo Operatori
		5 Operatori Tecnici
		3 Operatori Qualificati
		2 Operatori Qualificati
<i>Agenti di condotta</i>	Piove di Sacco	22 Macchinisti
	Rovigo	17 Macchinisti
<i>Capo Treno</i>	Piove di Sacco	23 CT
	Rovigo	20 CT
<i>Attività di manutenzione linea</i>	Piove di Sacco	1 Capo Unità Tecnica
		2 Operatori Qualificati

Tabella 1.3.1 – Organico di Sistemi Territoriali S.p.A. suddiviso per sede e incarico assegnato

1.4 Materiale Rotabile e Infrastruttura Ferroviaria

Al fine di inquadrare al meglio la struttura del materiale rotabile utilizzato da Sistemi Territoriali S.p.A., appare opportuna una breve trattazione sulla definizione di “treno”, della sua composizione, sulla struttura specifica degli elementi che la compongono e sul sistema su cui può circolare.

Si danno pertanto le definizioni seguenti:

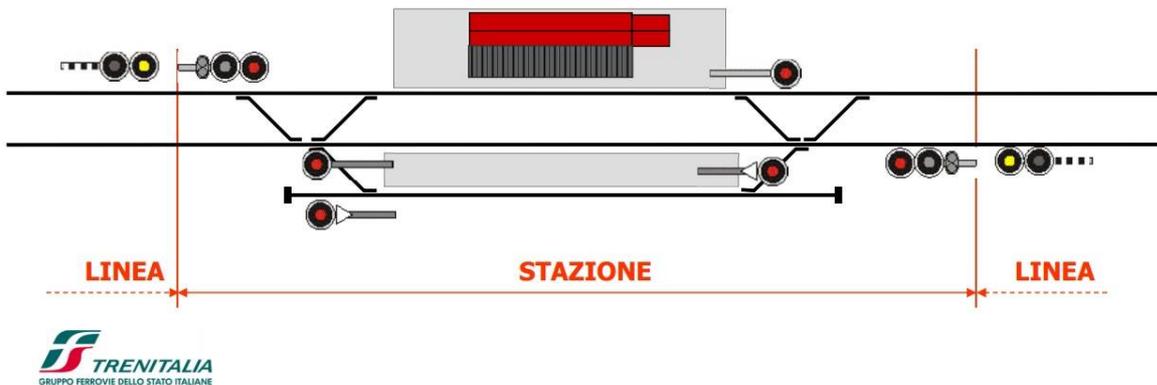
- **Convoglio:** è un complesso di uno o più rotabili ferroviari, con almeno una *unità di trazione*, dotato di sistema di frenatura e cabina di guida;
- **Treno:** Si definisce treno la circolazione di un mezzo di trazione, con o senza veicoli, da una *località di servizio* ad un'altra o che parta da una località di servizio per disimpegnare un servizio lungo la linea e faccia ritorno alla località di partenza. Un treno è pertanto un convoglio che si muove da un punto ad un altro dell'infrastruttura ferroviaria; la movimentazione lungo la linea viene regolamentato dai segnali ferroviari e la velocità massima ammessa di percorrenza viene determinata preventivamente per ciascun tratto di linea da percorrere. Ciascun treno deve essere caratterizzato da un specifico numero, univoco per singolo giorno di servizio e avente la seguente regola:

Treni con numero **pari** per percorrenze da sud-nord ed est-ovest

Treni con numero **dispari** per percorrenze da nord-sud ed ovest-est;

- **Unità di trazione:** Veicolo ferroviario dotato di apparato motore che può essere a potenza concentrata (locomotore) o distribuita (automotrice diesel o elettromotrice comunque definiti come materiale leggero), può essere dotato o meno della cabina di guida ma deve obbligatoriamente essere munito del comando del freno;

- **Località di servizio:** sono punti specifici dell'infrastruttura ferroviaria dove i treni possono compiere tutte le operazioni necessarie alla loro movimentazione e/o stazionamento; si parla pertanto di stazioni (manovre, precedenza, transiti o, nelle linee a semplice binario,



incroci)

Figura 1.4.1 - Schema di Stazione ferroviaria

Bivi nei quali si diramano più linee e i treni vengono inoltrati sulla linea attinente alla loro destinazione

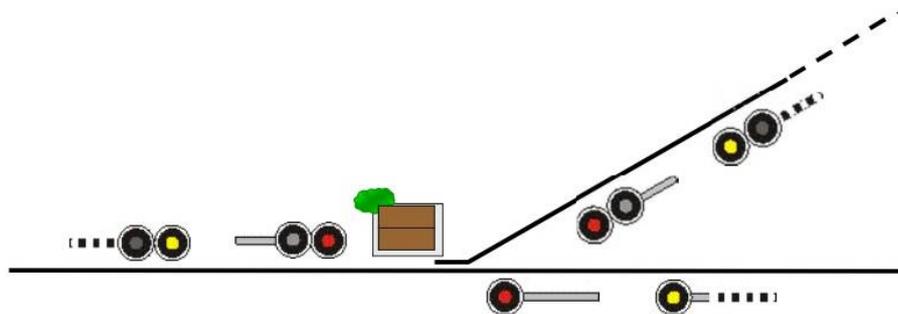


Figura 1.4.2 - Schema di Bivio ferroviario

Posti di passaggio tra doppio e semplice binario dove si effettua la confluenza a un tratto di linea da doppio a unico binario e viceversa

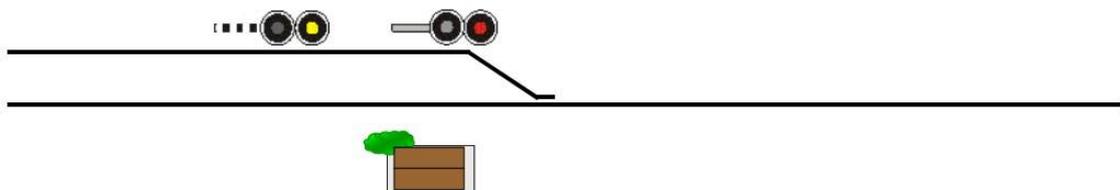


Figura 1.4.3 - Schema di Posto di Passaggio da doppio a semplice binario

Posti di blocco intermedi atti ad effettuare il distanziamento dei treni lungo la linea

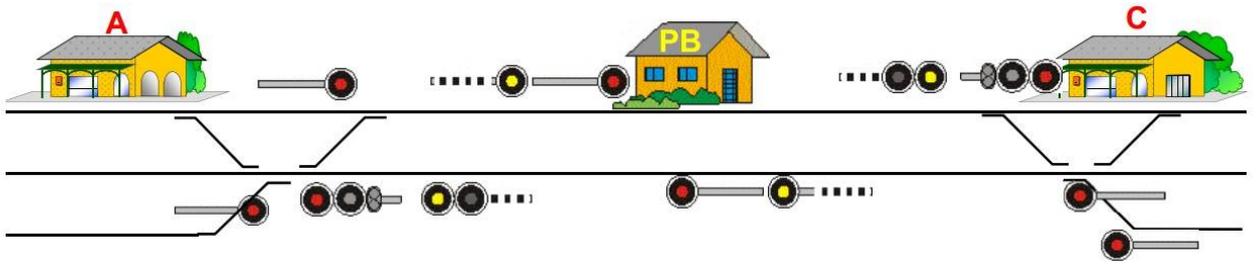


Figura 1.4.4 - Schema di Posto di Blocco Intermedio

Nelle località di servizio vengono svolte pertanto le attività e funzioni necessarie per la gestione del servizio ferroviario. Le località servono ai viaggiatori, alle merci e alla organizzazione in generale del trasporto ferroviario (distanziamento dei treni, direzione). Tutte le località di servizio sono protette da specifici segnali che devono esser rispettati dal macchinista.

Gli elementi tipici di un treno sono quindi:

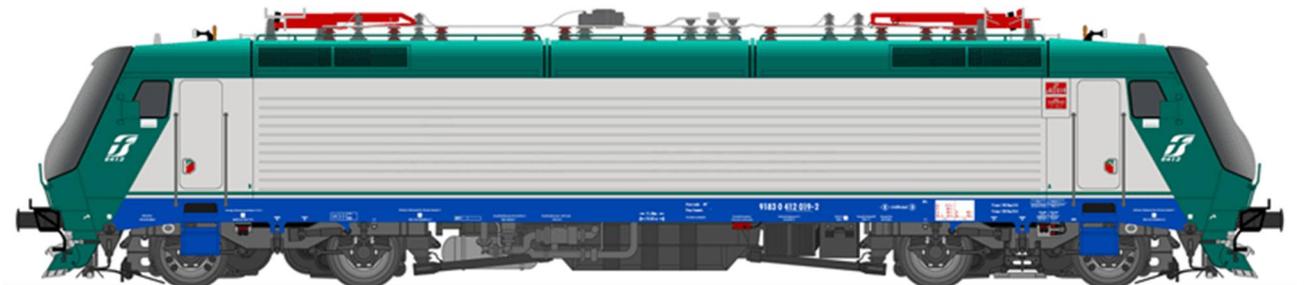


Figura 1.4.5 - Locomotiva Elettrica (E412)

La locomotiva, che ha pertanto la funzione di traino o, in alcuni casi specifici, di spinta del convoglio;



Figura 1.4.6 - Tipica composizione per il trasporto passeggeri regionale

La carrozza passeggeri, opportunamente allestita e avente specifica componentistica per poter svolgere il servizio a cui viene assegnata (trasporto regionale, media percorrenza, lunga percorrenza/Alta Velocità); il carro merci per il trasporto delle diverse categorie di merci, e la carrozza semipilota, dotata di una cabina di comando in grado di controllare la marcia del treno in senso opposto a quello previsto dal locomotore, dando ad esso comandi a distanza

(telecomando) consentendo l'inversione di marcia del treno senza dover spostare sempre "in testa alla composizione del treno" il locomotore.

Si definisce a questo punto 2 tipologie di treno per il servizio passeggeri:

- Composizione normale → con una composizione normale è possibile staccare una carrozza, aggiungerne altre o cambiare il locomotore con poche operazioni e in tempi brevi.
- Composizione bloccata → un convoglio bloccato o a composizione bloccata è un treno con una particolare configurazione di carrozze, che al contrario dei normali treni non è normalmente modificabile; per certi tipi di convoglio il cambio di configurazione richiede spesso interventi di grossa portata (tipico in tal senso è un elettrotreno) che possono essere effettuati solamente tramite il ricovero in un'officina attrezzata.

RFI identifica le composizioni bloccate mediante opportuno simbolo che viene affisso alle estremità destre di entrambe le testate del convoglio.

Un treno (o convoglio) a composizione bloccata può essere costituito da rotabili di tipo normale permanentemente accoppiati e viene disassemblato solo in occasione di manutenzione o di guasto. La sua configurazione tipo è:

Locomotiva + n. carrozze + carrozza semipilota, oppure
Locomotiva + n. carrozze + Locomotiva.

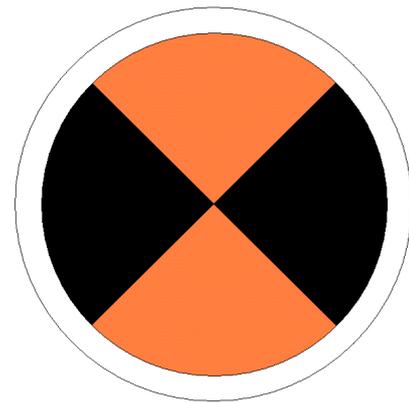


Figura 1.4.7 - Simbologia RFI per "Composizione Bloccata"

Altro tipo di treno bloccato è un convoglio di rotabili speciali tutti o in parte muniti di motori spesso accoppiati con carrelli comuni a due unità contigue. Questo tipo di convoglio necessita obbligatoriamente il ricovero in officina e attrezzature particolari per essere scomposto.

Caratteristica principale di una composizione bloccata è il fatto che non necessita di manovre per l'inversione del senso di marcia e permette quindi un notevole guadagno in termini di tempo nelle stazioni di termine corsa ed evita la caduta di potenzialità degli impianti di stazione dato che elimina la necessità delle manovre tradizionali. Ne sono un esempio i treni aventi locomotore telecomandabile e vettura pilota.

La struttura storica delle casse delle carrozze era composta da un telaio e da una copertura. Le casse venivano costruite con una gabbia di tubi d'acciaio a sezione quadra (brolli), che andavano a comporre una griglia in grado di dare rigidità alla struttura dei vari elementi, coperta poi con una lamiera in acciaio di pochi millimetri di spessore. Oggi, grazie all'enorme avanzamento delle lavorazioni dell'alluminio, si sta sempre più producendo verso casse realizzate in assemblaggio di estrusi o, come sta accadendo sempre più spesso, in pochi elementi (chiamati grandi estrusi) che da soli realizzano le fiancate e il soffitto della cassa. Tale tecnologia, anche se piuttosto costosa, ha il grande vantaggio di ridurre sensibilmente i costi relativi alle lavorazioni successive e di produrre mezzi molto leggeri; è possibile inoltre ottenere una precisione sulle tolleranze ed una finitura superficiale ben più elevate, con l'eliminazione degli antiestetici "bozzi" tipici delle lamiere saldate o rivettate tra loro. Il prossimo passo consiste nell'utilizzo di compositi polimerici, che uniscono alla leggerezza e alla lavorabilità dell'alluminio, la resistenza caratteristica dell'acciaio.

Altro elemento fondamentale nella struttura di un mezzo ferroviario è il **rodiggio**, ovvero l'insieme di tutti gli organi compresi fra le rotaie e la sospensione: ruote, cerchioni, assali, boccole/cuscinetti. Il rodiggio è anche l'insieme degli assi motori, accoppiati e portanti.

1.4.1 Materiale Rotabile per Servizi Passeggeri:

Attualmente Sistemi Territoriali S.p.A. dispone del seguente materiale rotabile per l'effettuazione del servizio passeggeri:

- N° 4 Automotrici diesel derivanti dell'ex-Società Veneta di tipo Aln 668 serie 600, costruite da OMECA tra il 1979 e il 1980. Le unità in possesso di Sistemi Territoriali S.p.A. sono la numero 605, 606, 609 e la 610.

Vennero consegnate nel 1980 dalla Officine Meccaniche Calabresi alla Società Veneta (S.V.A.) sei automotrici su disegno e con motori FIAT, costituenti il gruppo ADn 605, 606, 607, 608, 609 e 610, derivate tutte dalle ALn 668 serie 1000 delle Ferrovie dello Stato (FS). Analogamente alle automotrici di tipo Aln 668 della S.V.A., queste a differenza della serie 1000 in possesso a FS, non disponevano di intercomunicanti sulle testate, ma solamente di una porta di servizio e pedana ribaltabile oltre che ad un rapporto "al ponte", ovvero del rapporto di riduzione tra scatola del cambio e sala montata, più corto per consentire una maggior ripesa a discapito della velocità massima raggiungibile (90km/h anziché 120Km/h) che meglio si adattava alle fermate molto ravvicinate della linea Venezia Mestre-Adria. Due unità, le ADn 607 e 608, vennero assegnate alla Bologna-Portomaggiore, e quindi dal 1981 ai TraRo (Trasporti Romagnoli), mentre le altre 4 unità, le ADn 605, 606, 609 e 610, alla linea della Ferrovia Veneta.

All'inizio del 1990 venne commissionata la modifica delle testate al fine di sostituire la singola porta di servizio e pedana ribaltabile con degli intercomunicanti muniti di porte a doppio battente come era stato inizialmente previsto dal progetto originale FIAT per il gruppo FS.

Con il passaggio a Sistemi Territoriali S.p.A., nel 2002 il gruppo venne riclassificato come Aln 668.605, 668.606, 668.609 e 668.610.



Figura 1.4.1.1 - Automotrice ALn 668.610+668.609 in sosta nella stazione di Adria

- N°5 Automotrici FIAT Aln 663 serie 900, che fanno parte di un gruppo di 14 unità consegnato tra il 1984 e il 1998 dalla FIAT alle varie gestioni commissariali ed aziende eredi dell'impero S.V.A., di fattura decisamente simile alle automotrici ALn 663 in quegli anni già in possesso a FS. Tali automotrici derivano da uno sviluppo delle Aln 668, per darne un'impostazione più moderna e con 63 posti a sedere. Come le Aln 668 serie 600, le ALn 663 presentano dei costi di esercizio e di manutenzione relativamente bassi. Attualmente al servizio passeggero sono state assegnate le ALn 663.905, 663.906, 663.908 e 663.909



Figura 1.4.1.2 – a) Automotrice Aln 663.909 in livrea originale (Ferrovia Veneta) al deposito locomotive di Piove di Sacco. – b) Automotrice Aln 663.908 nella nuova livrea di Sistemi Territoriali in stazione a Loreo

- N°3 Vetture rimorchio semipilota, realizzate accanto alla produzione delle automotrici ALn 663, concettualmente identiche se non per la mancanza della propulsione diesel; sono state concepite per operare in coda alla composizione e orientate con l'unica cabina di guida di cui sono munite per poter pilotare in telecomando fino ad un massimo di 2 automotrici.



Figura 1.4.1.3 - Semipilota BP 663.374 in nuova livrea in partenza da Venezia S. Lucia

- N°2 Automotrici articolate (dette anche autotreni) GTW 2/6 classificate come ATR 110 serie 201 e 202 con trazione ibrida diesel-elettrico (descritto nel seguito), acquistati tra il 2006 e il 2007. Questi autotreni presentano 2 assi motori, ubicati nella sezione centrale, su un totale di 6 assi. Il convoglio del GTW 2/6 è composto da tre moduli: due semicasce, destinate al trasporto viaggiatori, e il modulo centrale, contenente tutte le apparecchiature necessarie alla trazione (gruppi termici diesel, generatrice elettrica, elettronica di bordo e motori elettrici per trasmettere il moto agli assi motori). Quest'ultimo modulo funziona anche come appoggio per le due semicasce ed è strutturato in modo da mantenere un corridoio centrale per permettere ai viaggiatori di transitare tra le stesse. Le due semicasce sono entrambe dotate di un carrello portante e di cabina di guida.

Grazie al comando multiplo è possibile accoppiare i convogli tra loro fino ad un massimo di tre unità.



Figura 1.4.1.4 – Autotreno ATR 110.201 nel deposito locomotive di Pieve di Sacco

- N°5 Autotreni GTW 4/12, due classificati come ATR 120.401-402 e 120.403-404 e tre come ATR 126.001, 126.002 e 126.003, progettati come versione a grande capacità degli ATR 110 a 2 casse. Il convoglio del GTW 4/12 è composto per un complessivo di 6 moduli: 4 semicasce destinate esclusivamente al trasporto viaggiatori e le altre 2 (di testata) munite della cabina di guida, e due moduli di trazione contenenti le apparecchiature motore.



Figura 1.4.1.5 - Autotreno ATR 126 nel deposito locomotive di Pieve di Sacco

- Un autotreno ATR 115 per il servizio regionale, costruito sempre da Stadler Rail e appartenente alla famiglia GTW 2/6. Gli ATR 115 sono una serie di autotreni a 2 casse, costruiti per l'esercizio sulla linea Brescia-Iseo-Edolo, gestita da Trenord S.r.l., inizialmente marcato come ATR 110, venne riclassificato come ATR 115 all'atto dell'ingresso in servizio da parte di Trenord S.r.l., e infine come ATR 116 con la messa in esercizio da parte di Sistemi Territoriali S.p.A.



Figura 1.4.1.6 - a) Autotreno ATR 115 in servizio sulla linea Brescia-Edolo di Trenord S.r.l. - b) Autotreno ATR 116 stazionato a Rovigo per servizio di Sistemi Territoriali S.p.A.

1.4.2 Materiale Rotabile per Servizi Merci:

Per il servizio di trasporto merci Sistemi Territoriali S.p.A. può avvalersi di un cospicuo parco locomotive:

- **N°7 Locomotive D753**, sono di tipo diesel-elettriche progettate e costruite per le ČSD, (le ferrovie dello Stato della ex Cecoslovacchia) che le avevano immatricolate nella Serie T 478.3 (e dal 1988 nella serie 753); un certo quantitativo di esse è stato acquisito o noleggiato da alcune Imprese Ferroviarie Italiane come le Ferrovie Nord Milano, Sistemi Territoriali, RTC-Rail Traction Company e la Ferrovia Sangritana dopo avere ottenuta l'omologazione della RFI (CESIFER). La base progettuale era rappresentata dal precedente tipo T 478.1; le nuove locomotive vennero progettate per un servizio multiruolo, da treno viaggiatori pesante e da treno merci con la velocità massima di 100 km/h. Fra il 1968 ed il 1977 ne vennero costruite e fornite diverse serie, ciascuna con differenze di allestimento e di motorizzazione, per un totale di ben 408 unità immatricolate come Gruppo T 478.3 che presto sostituirono le locomotive a vapore su gran parte delle linee non elettrificate principali.

Le locomotive presenti in Italia sono arrivate a partire dal 2001 e sono state oggetto di svariate modifiche e trasformazioni, da parte della ditta Leon d'Oro di Marmiolo, per adattare agli standard richiesti per la circolazione in Italia; a seconda della motorizzazione sono state immatricolate come D.752 quelle che conservano la motorizzazione di costruzione ceca e come D.753 quelle con nuova motorizzazione Caterpillar.

Attualmente risultano di proprietà di Sistemi Territoriali S.p.A. le D753.001, D753.002, D753.003, D753.004, D753.005, D753.006, D753.007; Si specifica tuttavia che ad oggi sono state tolte dal servizio le D753.002 e D753.007 entrambe a causa dello sviluppo di incendi, manifestati in ambiti diversi, che ne hanno compromesso irrimediabilmente il funzionamento (ma in attesa di restauro).



Figura 1.4.2.1 – D753.006 e D753.003 in doppia trazione per il treno delle bramme

- **N°2 Locomotive elettriche Bombardier TRAXX E483** appartenenti alla famiglia di locomotive elettriche TRAXX (Transnational Railway Applications with eXtreme fleXibility) che raggruppa una serie di modelli di locomotive costruite per i mercati europei prima da ADTranz e da Bombardier poi, utilizzate in Germania, Italia, Lussemburgo, Svizzera, Francia e Spagna.

A livello tecnico il rodiggio di tutto il gruppo è Bo'Bo', con due carrelli motori impernati a scartamento standard (1 435 mm). La lunghezza del corpo macchina varia tra i 15 750 mm delle E.464 monocabina ai 19 400 della E.412. Il peso varia tra le 70 e le 90 tonnellate. I motori installati sono asincroni trifase, con diversi tipi di convertitori statici che la rendono adatta a diverse tensioni a seconda delle caratteristiche del paese in cui è in uso: esistono versioni da 15 kV AC 16,7 Hz, 25 kV AC 50 Hz, 1,5 kV CC, 3 kV CC.

La potenza varia tra i 3 500 e i 4 200 kW, aumentati a 5 600 nelle unità di seconda serie, con forze di trazione che arrivano a 300 kN.

Gli impianti frenanti sono di tipo Knorr, e possono montare un impianto di recupero energetico. Dal punto di vista della sicurezza, si tratta di mezzi all'avanguardia, che possono montare i sistemi ETCS, Integra-Signum, ZUB o SCMT a seconda dell'appartenenza.



Figura 1.4.2.2 – E483.026 in viaggio per Villa Opicina con carri vuoti

CAPITOLO 2. La Manutenzione

Il capitolo viene suddiviso in quattro sottosezioni dove la manutenzione viene analizzata inizialmente a livello generico, a cui verranno poi verranno spiegate le principali strategie manutentive; si passa successivamente ad una trattazione specifica, in particolar modo, della manutenzione dei rotabili ferroviari. Si conclude quindi la teoria di base concentrando l'attenzione sull'analisi di Weibull che tornerà utile nei capitoli successivi.

2.1 LA MANUTENZIONE IN GENERALE

Vengono ora fornite alcune indicazioni sulle varie tipologie manutentive attualmente usate in ambito industriale, inserite all'interno di un contesto in cui politica e strategia organizzativa rappresentano i fattori "leganti" del servizio:

2.1.1 Introduzione

In questo paragrafo si andrà a mettere in luce alcuni aspetti storici ed evolutivi della manutenzione, intesa come servizio aziendale, allo scopo di evidenziare come la manutenzione, da servizio complementare e distaccato dalla produzione, stia diventando parte integrante dell'attività produttiva attraverso una razionale organizzazione del lavoro e di integrazione con le altre funzioni dell'impresa.

2.1.1.1 Cenni storici:

L'evoluzione della tecnica, la ricerca di una maggiore efficienza tecnico-economica delle società manifatturiere e lo sviluppo dei processi tecnologici, hanno portato alla costruzione di macchine sempre più complesse e delicate e hanno mutuato l'approccio alle metodologie risolutive di alcuni problemi.

Tra questi, uno dei più sentiti in questo periodo storico è forse l'esigenza di *mantenere* inalterata l'efficienza degli impianti e delle macchine che li compongono, cioè della "manutenzione" ovvero quella funzione aziendale preposta al ruolo di assicurare la continuità di buon funzionamento delle strutture produttive.

Se da un lato le macchine di un tempo erano meno perfezionate e più facili a rotture è altresì vero che il livello di complessità raggiunto e le esigenze delle linee di produzione moderne non consentono più al servizio di manutenzione di limitarsi ad operare con "semplicità" di un tempo. Doversi adeguare al livello tecnologico non solo in termini di riparazioni complesse ma anche di

studio di molteplici aree quali la meccanica, l'elettricità, l'elettronica, la pneumatica, il software, la riprogettazione in tutti i suoi aspetti, con importanti implicazioni in ambito produttivo, manageriale ed economico.

La manutenzione moderna, concepita come *servizio* aziendale, si basa su alcune proprietà che la contraddistinguono rispetto ai modi di esecuzione caratteristici del passato periodo storico-industriale:

- Il lavoro di manutenzione, in passato prevalentemente legato al singolo evento, di trasforma in *lavoro programmabile*
- La funzione “manutenzione”, spesso slegata e spesso considerata semplicemente complementare alle attività produttive, si trasforma in una *unità responsabile* caratterizzata da razionalità e competenza nonché da un forte senso di *integrazione* nelle attività dell'impresa
- La manutenzione è oggi chiamata a *programmare, coordinare e controllare* le sue attività in modo che il lavoro svolto da tutta l'impresa sia tecnicamente più completo ed economicamente vantaggioso
- La *formazione del personale* assume un ruolo molto importante nel creare la mentalità adatta ad accettare le nuove procedure organizzative ed a renderle operativamente efficaci
- La moderna manutenzione è anche chiamata a migliorare e conservare i dispositivi che garantiscono la *sicurezza* e la *salute* del lavoratore; si rende pertanto necessaria un'opera di *responsabilizzazione* rivolta a incrementare l'efficienza del servizio e la contemporanea tutela del personale

Per manutenzione si intende quindi quella funzione aziendale cui sono demandati *il controllo costante degli impianti e l'insieme dei lavori di riparazione e revisione necessari ad assicurare il funzionamento regolare e il buon stato di conservazione degli impianti produttivi, dei servizi e delle attrezzature di stabilimento* (OCDE, 1963). In base a questa definizione, la funzione manutenzione è quindi rivolta allo svolgimento di un servizio a vantaggio della produzione.

La manutenzione ha acquistato, nel corso del tempo, un'importanza sempre maggiore per i motivi sopra esposti. Il continuo estendersi della “macchina” in qualsiasi settore di produzione o di servizio, in ogni possibile fase dei processi produttivi, a livelli tecnici e tecnologici sempre più spinti ha come diretta conseguenza la necessità di interventi preventivi e correttivi del guasto che siano organizzati e la cui esecuzione sia inquadrata in schemi definiti (procedure di manutenzione). Questi metodi potranno servire a contenere l'onere tecnico ed economico altrimenti sempre

crescente che la manutenzione inevitabilmente comporterebbe considerando l'attuale progresso tecnologico.

2.1.1.2 I compiti aziendali della manutenzione e i collegamenti con le altre funzioni

Quanto messo in luce nel paragrafo precedente evidenzia che spesso in passato la manutenzione veniva condotta secondo una metodica intuitiva, quindi non con gli stessi criteri di ottimizzazione con cui si è sviluppato l'approccio di miglioramento nella organizzazione della produzione. Solo recentemente di è cominciato a riconoscere il compito di funzione corresponsabile del buon andamento dell'impresa e ad inquadrarla con maggior precisione all'interno dell'attività produttiva. Alcuni autori tendono a collocare la manutenzione *all'interno* della produzione, altri a sganciarla, cioè a renderla un comparto simile alla progettazione (a monte del processo) o alle vendite (a valle) o in una posizione intermedia e fortemente coinvolta nel ciclo produttivo.

Il gestore del servizio di manutenzione ha perso nel tempo il ruolo del semplice operaio-caposquadra per assumere il ruolo sempre più preminente di manager, occupandosi sia dell'aspetto tecnico che di quello economico e progettuale, creando in tal modo una nuova figura professionale all'interno dell'organigramma aziendale. In tal senso risulta evidente l'importanza delle relazioni che un servizio complesso deve intrattenere con le altre funzioni a cui può non appartenere ma con le quali è in continuo rapporto e si confronta quotidianamente in termini di efficienza ed efficacia allo scopo di raggiungere l'obiettivo comune aziendale.

Compiti e relazioni interne variano e si configurano operativamente e gerarchicamente in modo diverso in funzione delle varie realtà industriali in cui si viene ad operare, a tal punto che alcune aziende ritengono che, per le operazioni di manutenzione più rilevanti sia opportuno ricorrere a personale esterno.

In generale si possono definire come segue gli obiettivi e gli incarichi che, un moderno servizio di manutenzione aziendale è chiamato a raggiungere e a risolvere:

1. Obiettivi:

- a.** Assicurare l'esistenza e il buon funzionamento dei sistemi di sicurezza e di prevenzione contro infortuni diretti o indiretti alle persone e alle cose, contro emissioni ambientali pericolose nei termini (e oltre) di quanto disposto dalla vigente legislazione in materia.
- b.** Gestire le risorse aziendali allo scopo di minimizzare i costi derivanti dalla possibile rotture e/o dalla riparazione delle risorse tecniche destinate alla produzione.

- c. Operare con continuità allo scopo di limitare il decadimento delle prestazioni delle macchine.
- d. Formare ed educare gli addetti di produzione ad alcuni aspetti di correttezza e sicurezza nell'utilizzo dei macchinari e responsabilizzarli nei confronti della gestione delle anomalie e dei guasti agli impianti.

Il raggiungimento degli obiettivi è vincolato alle azioni pratiche che la manutenzione deve porre in atto e gestire nell'eseguire il compito a cui è preposta. Alcune di queste azioni possono essere pertanto:

- Effettuare interventi correttivi, cioè a guasto avvenuto, o di prevenzione del guasto stesso sul macchinario, per il mantenimento dell'efficienza, l'esecuzione di modifiche funzionali, l'aggiornamento di sistemi di sicurezza.
- Organizzare e gestire gli interventi e i materiali necessari sia in termini di tempo che di priorità, tecnologiche, produttive, economiche ed umane.
- Riconoscere e gestire i casi in cui può essere necessario ricorrere a competenze esterne, cioè all'utilizzo di strutture e/o personale esterno ai propri per risolvere problemi di particolare importanza dimensionale o tecnologica.
- Occuparsi con continuità del miglioramento (improvement) dei mezzi tecnici a disposizione (per la diagnostica e la riparazione), attraverso revisioni periodiche che ne assicurino il corretto grado di precisione e attraverso l'eventuale definizione del momento di sostituzione
- Formare il proprio personale al corretto utilizzo degli strumenti e alla conoscenza delle macchine su cui si opera, ad utilizzare la documentazione sistematicamente tecnica e a riconoscere i limiti della propria competenza.
- Collaborare con tutte le funzioni aziendali coinvolte nel processo di installazione, gestione e utilizzo del macchinario allo scopo sia di raccogliere il maggior numero di informazioni possibili su cui basare le proprie strategie di intervento che di instaurare un miglior rapporto umano e di collaborazione reciproca all'interno della struttura aziendale.
- Gestire i riordini e le quantità delle scorte di materiali (ricambi e materiale di consumo relativo alla manutenzione) da tenere a magazzino, nell'ottica di ottimizzare sia l'efficienza dell'intervento di riparazione o di revisione che l'investimento in materiali immobilizzati
- Mantenere una chiara e corretta memoria storica sulla natura delle azioni intraprese sulle diverse unità produttive e sulle strategie e i mezzi adottati per risolvere i problemi insorti.

- Formare il personale produttivo a condurre autonomamente sia una prima diagnosi del guasto e a risolverlo se di lieve entità, nonché all'utilizzo delle procedure per il fermo della macchina e l'inoltro della necessaria documentazione.

Il gestore del servizio di manutenzione rappresenta l'anello di congiungimento tra il personale operativo della squadra e il rimanente complesso aziendale. Ha la responsabilità di gestire e motivare il personale al raggiungimento degli obiettivi, di studiare delle strategie "ad hoc" in relazione al singolo caso da risolvere, di approntare le tecniche per la gestione delle risorse, di assecondare il miglioramento continuo e l'introduzione di nuovi strumenti e metodologie organizzative.

Il responsabile, per raggiungere gli obiettivi preposti, dovrà quindi risolvere alcuni problemi tra cui:

- Determinare, in funzione dell'ambiente operativo, le politiche di manutenzione da utilizzare.
- Dimensionare opportunamente le risorse umane e tecniche in relazione alla politica adottata e alle condizioni dell'ambiente operativo.
- Determinare le politiche di approvvigionamento dei ricambi in funzione della loro criticità.

La figura del responsabile non è più quindi quella del semplice controllore ma assume una connotazione manageriale di rilievo sempre crescente, anche in termini economici, l'investimento aziendale nei mezzi che garantiscono la continuità di funzionamento delle macchine.

2.1.2 Teoria della manutenzione: la gestione delle macchine

Nel presente paragrafo, si espongono alcune basi teoriche relative alla gestione delle macchine, delle informazioni, dei materiali e del personale di manutenzione:

2.1.2.1 Generalità

Una generica macchina viene progettata e costruita per svolgere una missione nota a priori e di cui si conoscono le caratteristiche in termini di tempi, prestazioni e costi. Il suo funzionamento, basato quindi sulla continua interazione tra i sottosistemi che la compongono, non è tuttavia continuo nel tempo a causa delle inevitabili anomalie che insorgono nel corso della sua vita utile e che possono essere determinate da svariati fattori umani e ambientali. In questo contesto di possibile interruzione della sua funzionalità si inseriscono i concetti di *affidabilità* e *disponibilità*.

L'affidabilità può essere definita come *la probabilità che un elemento (macchina, sottosistema o componente) funzioni senza guastarsi per un determinato tempo "t" dal suo avviamento ed in predeterminate condizioni ambientali*.

La disponibilità può invece essere definita come *la percentuale di tempo di buon funzionamento rispetto al tempo totale in cui è richiesto il funzionamento stesso dell'elemento (macchina, sottosistema o componente)*.

Affidabilità e disponibilità, come si vedrà nel seguito, rappresentano due grandezze attraverso le quali è possibile misurare la continuità con cui un elemento può garantire il raggiungimento della missione per la quale è stato ideato e costruito.

In ambito economico, l'implementazione a livello industriale di teorie affidabilistiche applicate a risorse produttive comporta inevitabilmente dei costi che devono essere equilibrati in funzione dello scopo finale.

Nel seguente grafico si può qualitativamente osservare che la funzione del costo totale sostenuto è data dalla somma dei costi sostenuti per le azioni di incremento dell'affidabilità o della disponibilità delle macchine e dei costi di mancata produzione dovuti all'inaffidabilità o indisponibilità delle stesse:

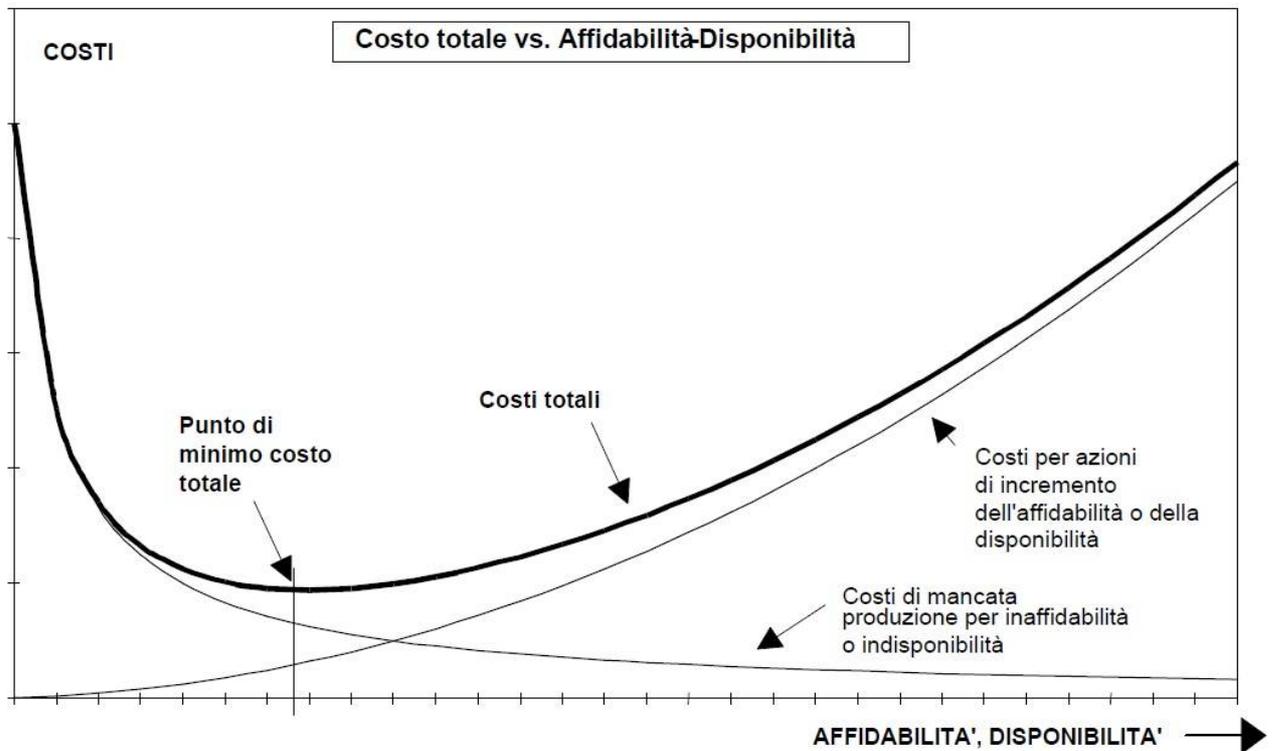


Figura 2.1.2.1.1 - Diagramma Costi totali Vs. Affidabilità/Disponibilità dell'impianto

Se in ambito sicurezza, l'affidabilità assume un ruolo della massima importanza, a livello produttivo il suo posto viene spesso preso dalla disponibilità attraverso la quale il gestore d'impianto riesce a monitorare la reale efficienza operativa delle macchine nel corso della loro vita utile.

Poiché, come già affermato, le macchine si guastano, l'affidabilità e la disponibilità vengono garantite, ove possibile, attraverso adeguate *politiche manutentive* che, se da un lato contribuiscono ad un funzionamento globale regolare e continuativo, dall'altro rappresentano un onere economico spesso non indifferente, intervenendo:

- In sede di gestione dell'impianto.
- Nella progettazione o riprogettazione di parti o insiemi di macchine o nell'installazione di unità di riserva (sistemi ridondanti).

2.1.3 Affidabilità

Lo studio dell'affidabilità si applica in genere a meccanismi che, nel corso della vita utile, non possono essere tecnicamente o economicamente riparati.

Si consideri ad esempio il caso di un determinato tipo di lampadina. Si tratta di un oggetto la cui funzione si esaurisce dopo un certo numero di ore di funzionamento e che non può essere riparato.

Un metodo semplice per stimare l'affidabilità dell'esempio appena trattato è il seguente:

- Vengono presi un certo numero di lampadine, ad esempio 100, e le si accendono tutte contemporaneamente fissando il momento di accensione come "tempo zero". Il compito delle lampadine è pertanto quello di rimanere accese.
- Dopo alcune ore di funzionamento alcune lampadine inizieranno a bruciarsi "cessando il loro funzionamento": ipotizzando che le lampadine che smettono di funzionare siano 2 dopo un'ora di tempo. Si ottiene che l'affidabilità, in questo caso specifico per una lampadina presa a campione tra quelle prodotte, è del 98% in un'ora.
- Si continua ad ipotizzare quindi che dopo 1000 ore di funzionamento si siano spente 30 lampadine ottenendo quindi 70 lampadine su 100 ancora attive. Si può affermare quindi che l'affidabilità del tipo di lampadina scelto è del 70% su 1000 ore di funzionamento e così via.

Il risultato di questo test può essere visualizzato in un grafico qualitativo come quello riportato qui di seguito:

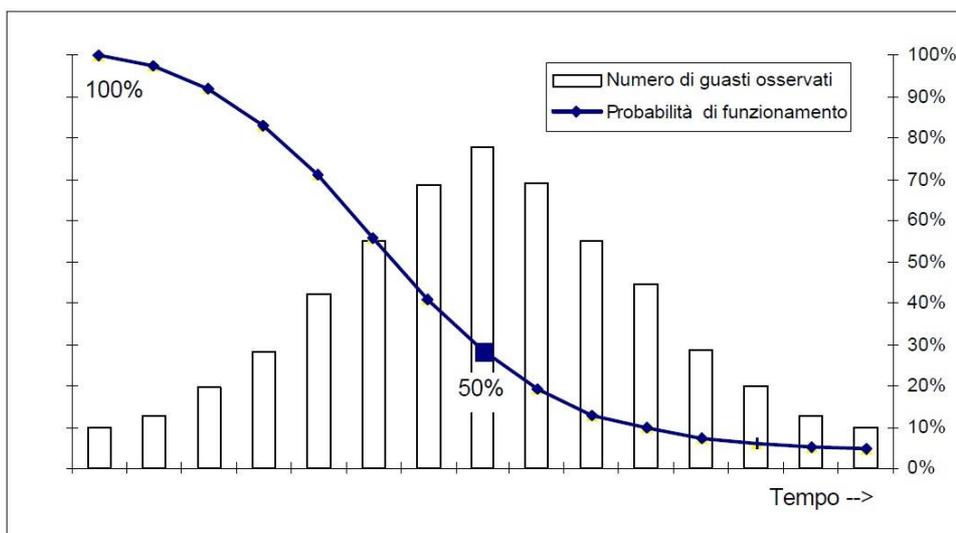


Figura 2.1.3.1 - Grafico qualitativo dell'affidabilità inerente all'esempio delle lampadine

Come si può osservare, nel diagramma vengono messe in evidenza contemporaneamente le curve del numero di guasti osservati e la probabilità di buon funzionamento della lampada al variare del tempo secondo una legge di tipo gaussiano.

L'esempio permette pertanto di ottenere le seguenti considerazioni:

1. Più elevato è il numero di lampadine testate e più precisa sarà la stima della probabilità di funzionamento. Nel caso limite infatti che si testassero un numero infinito di lampadine si otterrebbe l'esatta legge di guasto; operando quindi su un numero ristretto di componenti la precisione nella valutazione dell'affidabilità risulterà pertanto limitata.
2. Esistono molte leggi (gaussiane, esponenziali, log-normali, ecc.) che caratterizzano la probabilità di guasto nel tempo (e quindi l'affidabilità) per diversi tipi di componenti. Le più frequenti in ambito manutentivo sono la legge gaussiana (detta anche *normale*) e la legge esponenziale negativa.
3. Nell'ambito di dispositivi non riparabili, si può definire un *tempo medio al guasto* "MTTF" (Mean Time To Failure) ovvero il tempo tale per cui il 50% dei componenti testati ha cessato di svolgere la sua missione.

Si è visto quindi come l'affidabilità di un componente non riparabile coincida con la sua probabilità di buon funzionamento all'interno di un certo intervallo di utilizzo.

Facendo nuovamente ricorso all'esempio utilizzato in precedenza, la generica missione della lampadina è pertanto quella di rimanere accesa; tuttavia la lampada può esser impiegata per funzioni (o missioni) diverse che richiedono pertanto diversi livelli di affidabilità:

Si pensi ad esempio alle lampade per uso domestico e a quelle invece necessarie all'atterraggio notturno di un aeroplano o ai tipici sistemi di segnalazione ottici (di emergenza e di riferimento). I livelli di affidabilità richiesti variano pertanto in funzione delle *conseguenze di mancato funzionamento*.

In un'ottica manutentiva, conoscere la probabilità di buon funzionamento di un componente in un ben definito periodo di tempo (ovvero conoscerne l'affidabilità) consente di *intervenire prima che si verifichi il guasto*:

→ La lampada domestica può quindi esser tranquillamente sostituita dopo che si è verificata la rottura in quanto le conseguenze del suo mancato funzionamento sono estremamente ridotte.

→ La lampada posta sulla pista o sull'aereo necessaria al suo atterraggio in condizioni di scarsa visibilità dev'esser invece necessariamente sostituita (rinnovata) prima che si verifichi la rottura ovvero quando la sua affidabilità nel tempo scende al di sotto di un livello (a questo punto di sicurezza) imposto.

La definizione di affidabilità quindi per quanto riguarda i componenti ad “*alto rischio*” implica pertanto una precisa conoscenza delle condizioni di *normale funzionamento* e di *guasto* inteso come incapacità di mantenere o di portare a termine la “missione” affidata.

I presupposti per una corretta applicazione dell'affidabilità al mondo operativo possono essere individuati come segue:

- Definizione di un criterio univoco ed oggettivo (detta anche procedura o istruzione operativa) per il riconoscimento dello stato di guasto.
- Determinazione dell'intervallo di tempo “*t*” entro il quale la macchina o il componente considerato devono funzionare per portare a termine la missione (*durata minima necessaria*).
- Determinazione delle condizioni ambientali in cui la macchina o il componente deve operare per svolgere la sua missione.

2.1.4 Elementi di Affidabilità nel continuo

2.1.4.1 Probabilità di guasto, affidabilità e inaffidabilità

La trattazione fatta anteriormente per le variabili affidabilistiche, con riferimento a intervalli di tempo ΔT discreti e finiti, può essere estesa al caso continuo considerando intervalli di tempo dt infinitesimi. Si definisca quindi la variabile aleatoria t (tempo fino al guasto di una macchina) come il tempo percorso tra l'istante iniziale in cui si mette in marcia la macchina e l'istante in cui la macchina smette di funzionare. A partire da t , si può definire la probabilità di guasto $P(t; t + dt]$ come la probabilità che la macchina si guasti nell'intervallo $(t; t + dt]$. Nel continuo si è soliti esprimere la probabilità di guasto come il prodotto di una funzione $f(t)$, che chiamo densità di probabilità (o frequenza) di guasto, per un intervallo di tempo infinitesimo dt , in particolare:

$$P(t; t + dt] = f(t)dt = \text{probabilità di guasto per } t < x \leq t + dt$$

Introducendo la variabile fittizia x per esprimere lo scorrere del tempo t all'interno dell'intervallo $(t; t + dt]$ è possibile identificare $f(t)$ come la funzione che permette di calcolare la probabilità infinitesima $f(t)dt$ che la macchina si guasti nel periodo di tempo infinitesimo $(t; t + dt]$.

Matematicamente:

$$f(t)dt = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\text{probabilità di guasto per } t < x \leq t + dt}{\Delta t}$$

Una volta che si conosce il concetto di densità di probabilità di guasto $f(t)$, si può calcolare, attraverso la sua integrazione nel tempo, la funzione di distribuzione cumulata della probabilità di guasto $F(t)$ (o probabilità cumulata di guasto o inaffidabilità al tempo T), cioè, la probabilità che il guasto accada all'interno di un dato valore di intervallo T della variabile temporale t :

$$F(t) = \int_0^T f(t)dt$$

A livello grafico, la probabilità cumulata di guasto al tempo T è l'area sottesa dalla funzione $f(t)$ tra l'istante iniziale ($t = 0$) e l'istante finale T nel quale si desidera calcolare $F(T)$.

Per quanto riguarda la definizione dell'affidabilità $R(T)$, cioè la probabilità di sopravvivenza della macchina aldilà di T , si ottiene come complemento a 1 di $F(T)$:

$$R(T) = 1 - F(T) = 1 - \int_0^T f(t)dt$$

Ovviamente, se si pone il limite di tempo T a infinito la probabilità cumulata di guasto $F(T)$ risulta essere pari all'unità e, di conseguenza, l'affidabilità $R(T)$ è pari a zero. Matematicamente risulta quindi:

$$F(T = \infty) = \int_0^{\infty} f(t)dt = 1$$

Gli andamenti delle funzioni $f(t)$, $F(T)$ e $R(T)$ a livello indicativo sono illustrate nella figura seguente (tratta da "Principi generali di gestione della manutenzione", Furlanetto et al.,2006)

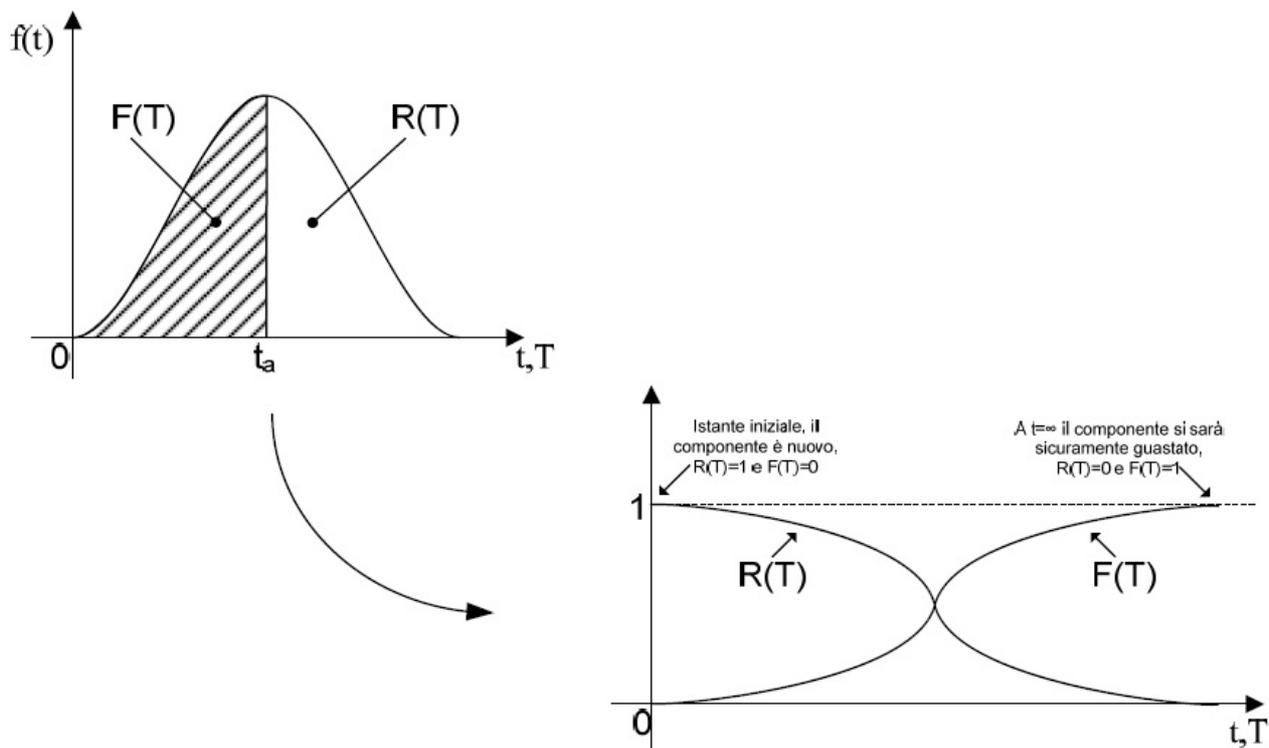


Figura 2.1.4.1.1 - Andamento funzioni $f(t)$, $F(T)$, $R(T)$

2.1.5 Disponibilità

Finora si è considerato il caso di macchine o componenti non riparabili ovvero con un singolo ciclo di vita (cuscinetti, lampadine, fusibili, resistenze, interruttori, ecc.)

Nel caso in cui sia invece possibile ripristinare la funzionalità, in particolare per quei dispositivi a cui viene richiesto più cicli del tipo *rottura-riparazione-ripristino* (anche più volte nel corso della vita utile), si ricorre spesso alla valutazione della *disponibilità*.

La normativa UNI 9910 definisce la disponibilità come:

Attitudine di un'entità a esser in grado di svolgere una funzione richiesta in determinate condizioni a un dato istante, o durante un dato intervallo di tempo, supponendo che siano assicurati i mezzi esterni eventualmente necessari.

La disponibilità "A" di una macchina può esser definita come la percentuale di tempo di buon funzionamento rispetto al tempo totale in cui è richiesto il funzionamento stesso della macchina.

Chiamati rispettivamente:

- UT (*Up Time*) il tempo in cui il sistema è realmente disponibile all'uso
- DT (*Down Time*) il tempo in cui la macchina è ferma per guasto o per riparazione

Allora la disponibilità A può esser espressa con la seguente espressione:

$$A[\%] = \frac{UT}{UT + DT} = \frac{UT}{T_{TOT}}$$

Nel caso dei sistemi riparabili è necessario sostituire al posto del MTTF (*Mean Time To Failures* o tempo medio prima che avvenga la rottura) il tempo medio che si riscontra tra due guasti ovvero il MTBF (*Mean Time Between Failures*) a cui deve obbligatoriamente aggiungersi un nuovo elemento definito come il *tempo medio di ripristino delle funzionalità* MTTR (*Mean Time To Restoration*).

Si può assumere pertanto che l'UT in questo caso coincida con il MTBF, mentre il DT con il MTTR ottenendo pertanto la modifica della relazione precedente come segue:

$$A[\%] = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} = \frac{MTBF}{T_{TOT}}$$

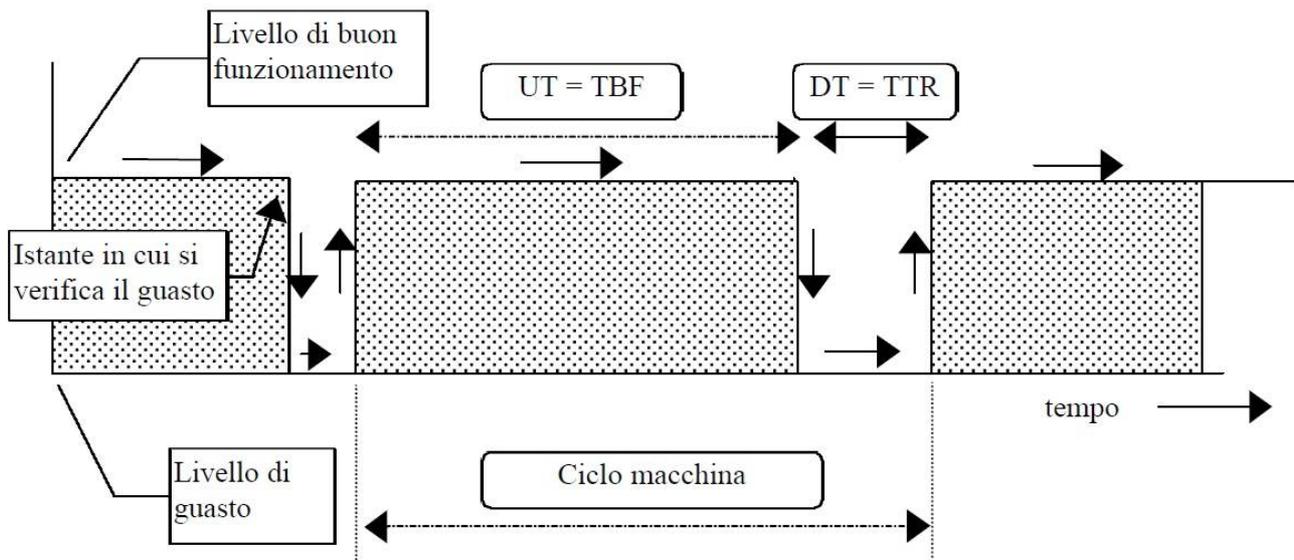


Figura 2.1.5.1 - Schema dei tempi per il calcolo dell'affidabilità

A parità di tempo medio tra due rotture (MTBF), una macchina o un componente facilmente riparabile risulta esser quindi più disponibile in quanto il MTTR risulta esser di entità inferiore; analogamente la disponibilità di due sistemi con tempo di riparazione pressoché identico risulta esser maggiore per il sistema avente MTBF superiore (ovvero al crescere della sua affidabilità all'interno del periodo di funzionamento richiesto).

2.1.6 Il tasso di guasto e la curva di mortalità

L'andamento del tasso di guasto $\lambda(t)$, ovvero la frequenza con cui le macchine si guastano nel corso della vita utile, può in genere esser rappresentato con una curva che, per la particolare forma, viene chiamata a “vasca da bagno”:

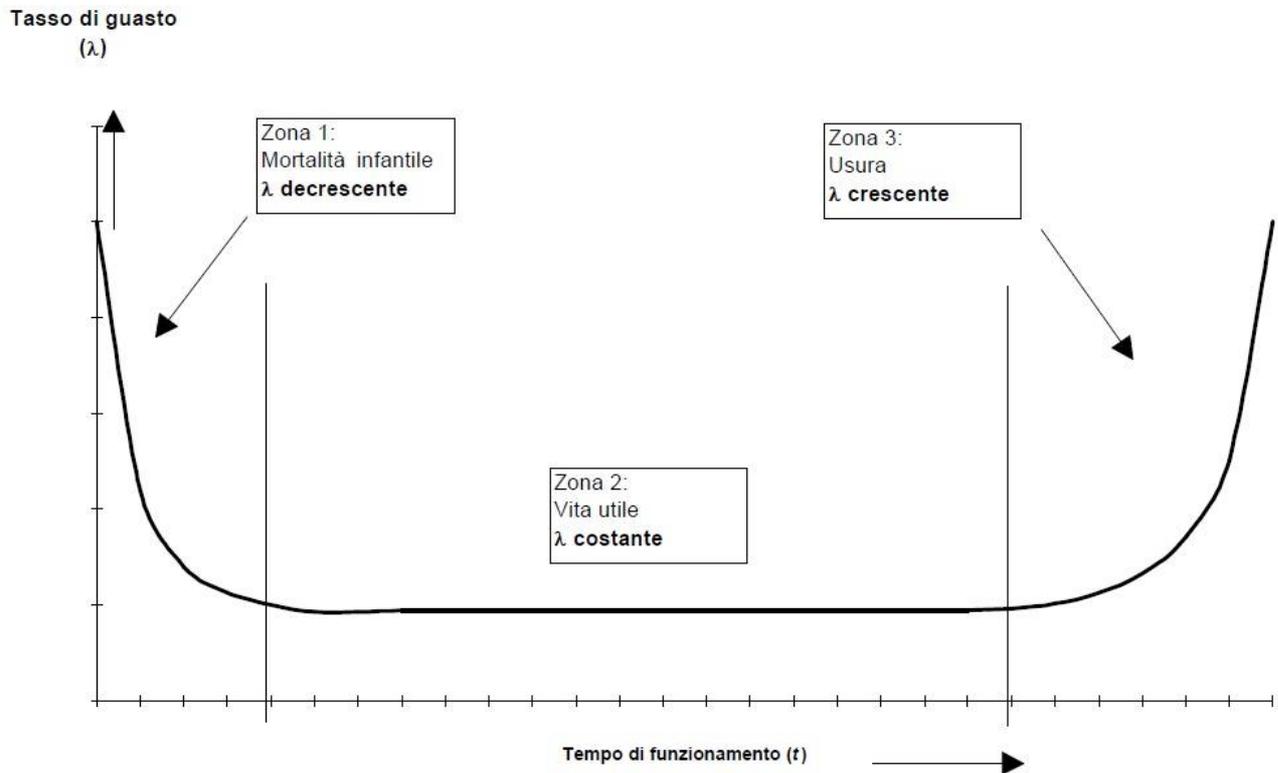


Figura 2.1.6.1 - Andamento del tasso di guasto $\lambda(t)$ al variare del tempo di funzionamento

La curva viene valutata pertanto durante tutto l'arco di vita utile del componente/macchina e viene suddivisa secondo tre periodi ben distinti tra loro:

1. Il periodo iniziale in cui la macchina/componente è in fase di “rodaggio”. In questa fase i componenti iniziano a svolgere la loro funzione e alcuni di essi, generalmente difettosi, possono rovinarsi o andare a rottura in breve tempo. Questo periodo viene pertanto chiamato anche con il termine di “mortalità infantile” e ad esso viene associato un tasso di guasto $\lambda(t)$ inizialmente molto elevato (guasti dovuti a difetti di produzione) che tende a ridursi rapidamente con il tempo di sopravvivenza del componente (**zona 1**).
2. Periodo centrale detto di “vita utile” o di “mortalità standard” (**zona 2**), in cui la macchina ormai funziona a regime, i componenti risultano pertanto ben assestati e, cosa da non trascurare, anche gli eventuali operatori possono esser considerati esperti all'uso. In questo periodo il tasso di guasto è costante e minimo (sono infatti ormai quasi totalmente al sicuro

da guasti dovuti a difetti di fabbrica) poiché i componenti cedono sulla base del loro utilizzo e la macchina subisce pertanto guasti a periodi molto distanziati e regolari nel tempo.

3. Fase di declino (**zona 3**) in cui l'apparato è soggetto a fenomeni di "usura" derivanti dall'intenso utilizzo o dall'eccessivo tempo di utilizzo (facendo riferimento all'ambito ferroviario negli anni ci si è sempre trovati di fronte ad un materiale rotabile, quale una locomotiva o una carrozza che a causa del deperimento nel tempo, per quanto si cerchi di mantenerli efficienti, durante il quotidiano funzionamento si incorre purtroppo in frequenti rotture). Il tasso di guasto in questo caso cresce notevolmente tanto più quanto si cerca di far continuare il funzionamento del rotabile (si guasta pertanto sempre più spesso finché non risulta inutilizzabile).

L'effetto sul tasso di guasto riferito all'assestamento iniziale dei componenti è in genere tanto più ridotto quanto migliori ed accurate sono la progettazione e l'installazione della macchina, oltre che al livello di addestramento degli operatori/utilizzatori, mentre l'effetto dell'usura è facilmente rilevabile a causa della tendenza in rapida crescita del numero di guasti in un fissato periodo di tempo.

La zona di maggiore interesse ai fini dell'affidabilità è pertanto quella riferita al periodo di "vita utile" nella **zona 2**.

In questa zona, in cui $\lambda(t)$ può essere assunto per semplicità *costante*, l'affidabilità può essere espressa con una legge esponenziale negativa del tipo:

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

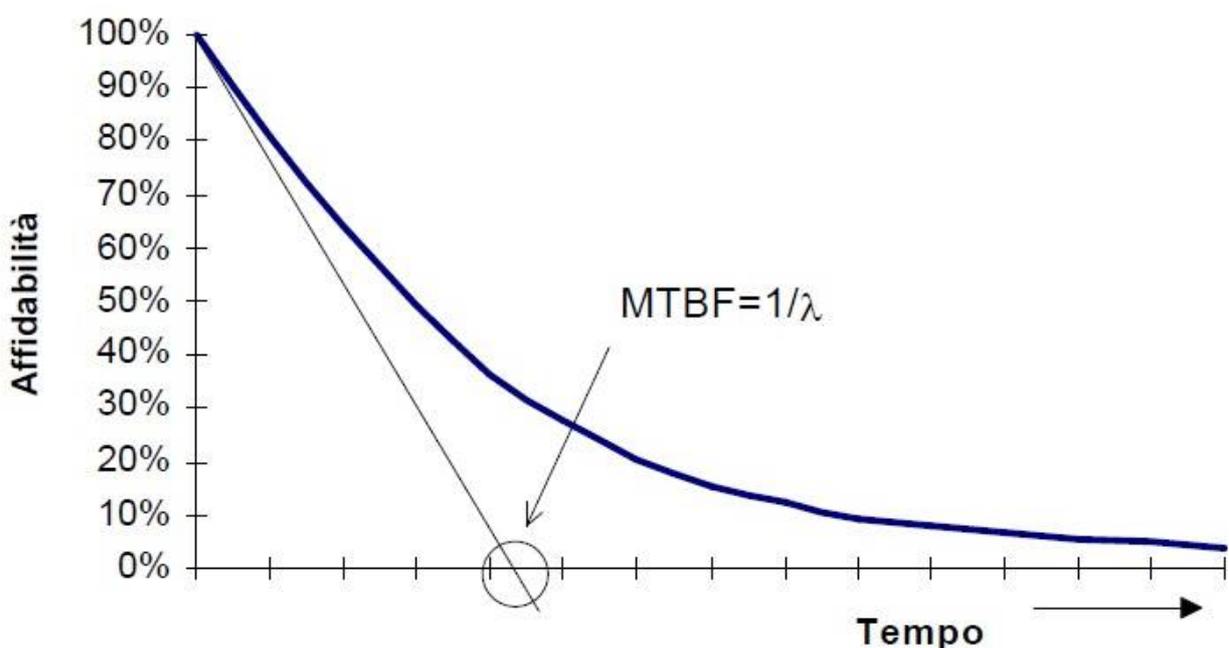


Figura 2.1.6.2 - Andamento dell'affidabilità utilizzando la legge esponenziale negativa

Operando nella zona di vita utile, e supponendo $\lambda(t)$ costante, allora il MTBF assume un valore che coincide con l'inverso del tasso di guasto:

$$MTBF = \frac{1}{\lambda(t)}$$

L'importanza di quest'ultima relazione appare chiara se si considera che, nel corso della vita utile di una macchina, un valore tipicamente *analitico* e ottenuto a livello progettuale (λ) è correlato direttamente con un *parametro operativo* (MTBF). Ipotizzare quindi di avere $\lambda(t)$ pressoché costante, implica pertanto un valore medio dell'intervallo di tempo tra due guasti (MTBF) anch'esso costante, con la diretta conseguenza che si rende possibile *stimare* con una certa precisione il momento in cui la macchina si guasterà in futuro.

Una progressiva diminuzione dell'MTBF (diminuzione del tempo medio di buon funzionamento) è indice dell'ormai raggiungimento del termine di vita utile (inizio **zona 3**).

Nel caso quindi di componenti ripristinabili è possibile a questo punto pensare di applicare opportune strategie per abbassare il più possibile il tasso di guasto $\lambda(t)$ e aumentare quindi affidabilità e disponibilità della macchina; si ricorre tipicamente a metodi *preventivi*, ovvero ad una politica manutentiva che si basa su *operazioni eseguite a intervalli di tempo programmati*. La programmazione degli eventi di manutenzione consente di mantenere il più possibile l'affidabilità e la disponibilità nel tempo prevenendo e contrastando il verificarsi del guasto.

La determinazione del corretto intervallo di intervento preventivo dipende dall'andamento del tasso λ (e quindi del MTBF) nella zona di vita utile.

2.1.7 I sistemi complessi

Finora si sono trattati sistemi per i quali è stata definita la funzione affidabilità $R(t)$, il tasso di guasto $\lambda(t)$, le relazioni che li uniscono e i significati a livello analitico e operativo.

La situazione affidabilistica cambia se più macchine (caratterizzate da livelli di affidabilità o disponibilità propri) vengono utilizzate contemporaneamente per assolvere ad un determinato scopo.

Si ipotizzi ad esempio al caso di una serie di pompe per la movimentazione di fluidi all'interno di uno stabilimento, la relazione in grado di indicare l'affidabilità complessiva del sistema presenta la seguente forma:

$$R_{sistema} = f(R_i) \quad i = 1 \dots n$$

L'affidabilità del sistema è pertanto funzione delle singole affidabilità di ciascun elemento i -esimo o macchina i -esima. Dato che R_i è nota a livello progettuale o empirico allora $R_{sistema}$ dipende dalla *configurazione* e dalla *natura* del sistema.

Si distinguono pertanto due famiglie principali di sistemi complessi:

- Sistemi in *serie*
- Sistemi in *parallelo* (detti anche *ridondanti*)

E' necessario stabilire a questo punto *quanto* l'affidabilità/disponibilità del sistema complesso sia *dipendente* dall'affidabilità/disponibilità dei suoi componenti.

Nel caso dei *sistemi in serie* questa dipendenza è totale: riprendendo l'esempio delle pompe idrauliche, la rottura di anche una sola pompa rende inefficiente o addirittura inutilizzabile l'intero sistema (non compie più la sua missione).

Nel caso dei *sistemi in parallelo* la definizione di guasto può esser definita dalle caratteristiche e/o prestazioni richieste dall'intero complesso; il guasto ad una pompa idraulica in un sistema composto da tre elementi, di cui però sia richiesto il buon funzionamento di almeno due di questi, non altera quindi il risultato operativo ma può influire sicuramente sull'affidabilità del sistema (nel caso se ne rompa anche una seconda il sistema deve esser obbligatoriamente arrestato per riparazione poiché non riuscirebbe a compiere il lavoro che gli viene richiesto).

2.1.8 Affidabilità dei sistemi in serie

Come già anticipato nel paragrafo precedente i sistemi in serie sono sistemi in cui il guasto ad un qualsiasi dei componenti che lo costituiscono causa l'inevitabile interruzione del funzionamento/servizio. Qui di seguito si riporta una rappresentazione schematica:

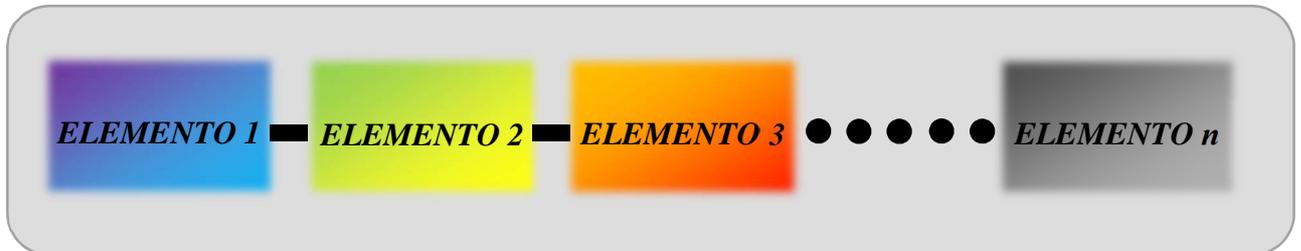


Figura 2.1.8.1 - Rappresentazione schematica di un sistema in serie

Gli elementi possono essere rappresentati nella realtà da interruttori in un circuito elettrico, elementi di una pompa pluristadio, dispositivi interdipendenti di un autoveicolo, ecc.

Fissato il numero di elementi n e l'affidabilità del singolo elemento, l'affidabilità globale del sistema è data da:

$$R_{sistema} = R_1 \cdot R_2 \cdot \dots \cdot R_n = \prod_{i=1}^n R_i$$

Se, ad esempio, in un sistema di 4 elementi, 3 presentano affidabilità (nel periodo di buon funzionamento richiesto) pari a $R = 0,9$ (90%) e uno di essi ha $R = 0,5$ (50%) allora l'affidabilità complessiva è pari a:

$$R_{tot} = 0,9 \cdot 0,9 \cdot 0,9 \cdot 0,5 = 0,3645 \text{ (36,45\%)}$$

Si può inoltre dimostrare che il tasso di guasto del sistema è uguale alla somma dei tassi di guasto dei suoi componenti:

$$\lambda_{sistema} = \sum_{i=1}^n \lambda_i$$

E che per tassi di guasto costanti (cioè all'interno del periodo di vita utile):

$$MTBF_{sistema} = \frac{1}{\lambda_{sistema}} = \frac{1}{\sum \lambda_i} = \frac{1}{\sum \left(\frac{1}{MTTF_i} \right)}$$

2.1.9 Affidabilità dei sistemi in parallelo

A livello schematico i sistemi che presentano componenti o macchinari in parallelo sono rappresentabili come segue:

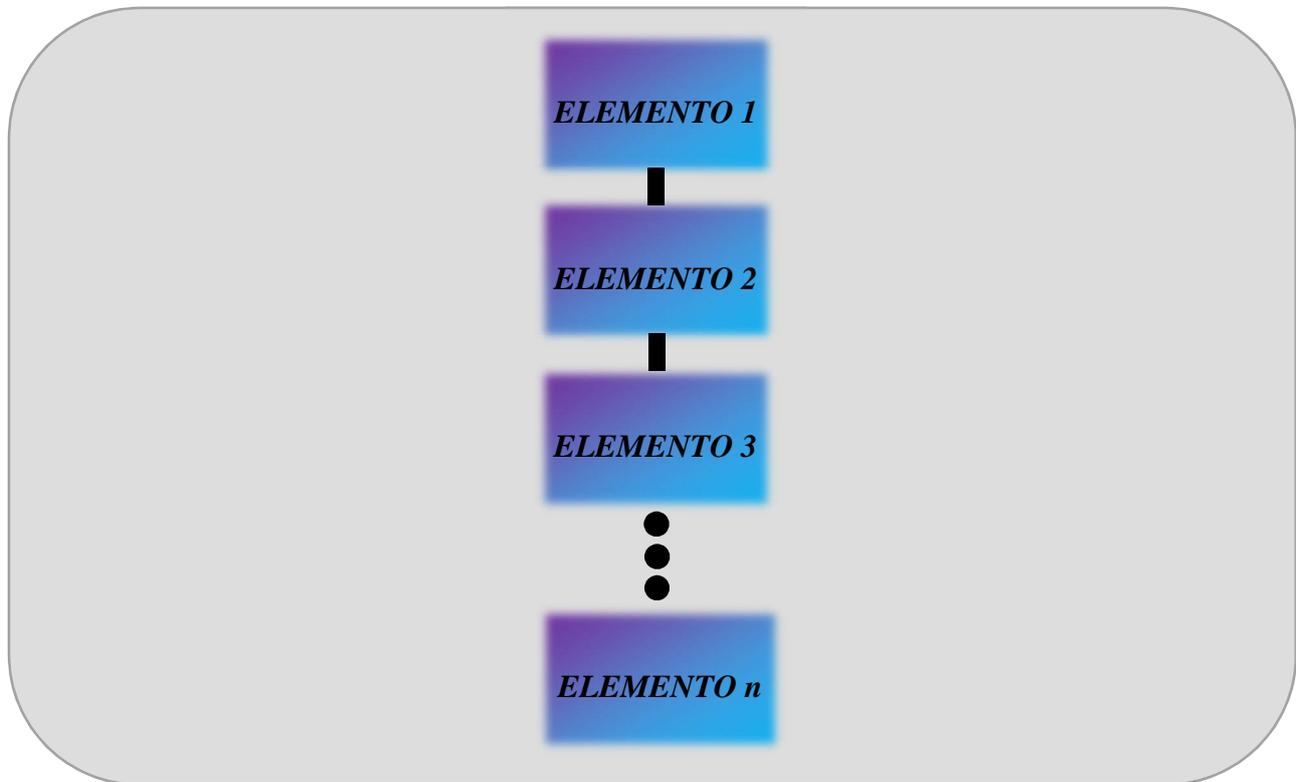


Figura 2.1.9.1 - Rappresentazione schematica di un sistema in parallelo

In genere complessi di questo tipo vengono costruiti allo scopo di potenziare le funzioni originarie dei singoli componenti con altri, posti in parallelo, ottenendo un'affidabilità complessiva più elevata e/o migliori prestazioni. Alla moltiplicazione degli apparati corrisponde tuttavia una pressoché proporzionale moltiplicazione dei costi (si può infatti escludere parte dei costi generali d'impianto del sistema). L'installazione di sistemi ridondanti viene eseguita generalmente quando la mancanza di funzionamento provoca gravi danno economici o funzionali (sicurezza, mancata produzione, rischio di danneggiamento ad altri componenti).

Per semplificare i calcoli si supponga di avere un sistema composto da due soli elementi posti in parallelo come mostrato qui di seguito:

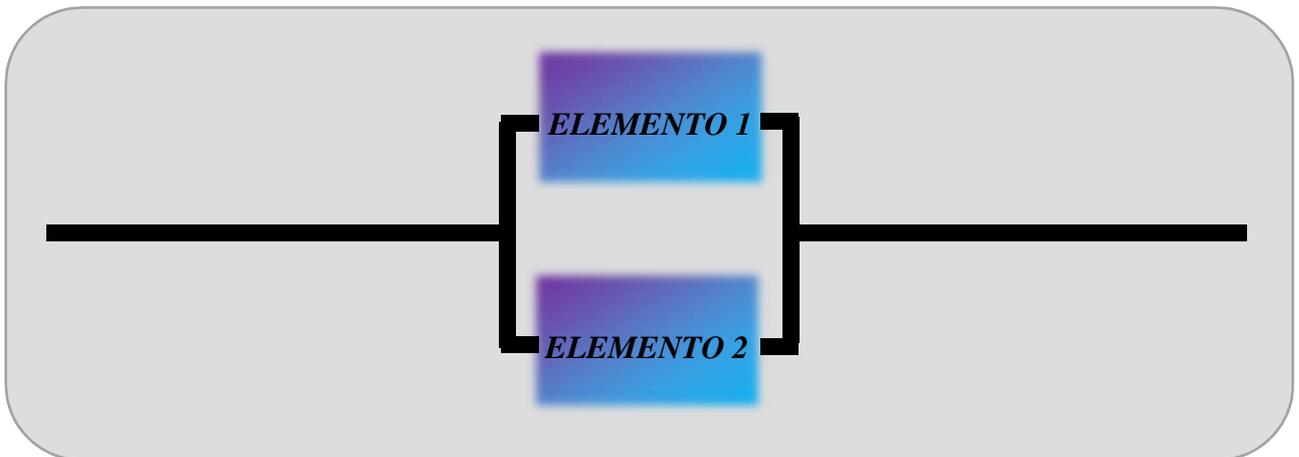


Figura 2.1.9.2 - Rappresentazione del sistema preso in esame

Definite rispettivamente l'affidabilità del sistema "R" e dei suoi componenti R_1 e R_2 e le loro inaffidabilità Q_i dove:

$$\text{Inaffidabilità } Q_i = 1 - R_i$$

Allora se il buon funzionamento del sistema deriva dalla condizione in cui almeno uno degli elementi è funzionante, si ha:

Elemento 1	Elemento2	Probabilità di buon funzionamento del sistema
Funziona	Funziona	$R_1 \cdot R_2$
Funziona	Non funziona	$R_1 \cdot (1 - R_2) = R_1 \cdot Q_2$
Non Funziona	Funziona	$R_2 \cdot (1 - R_1) = R_2 \cdot Q_1$

Tabella 2.1.9.3 – Probabilità di buon funzionamento in base alle combinazioni tra elementi della stessa funzione

La somma delle probabilità di buon funzionamento è data da:

$$R_{syst} = R_1 \cdot R_2 + R_1 \cdot (1 - R_2) + R_2 \cdot (1 - R_1) = R_1 + R_2 - (R_1 \cdot R_2)$$

In generale, per sistemi con n elementi in parallelo si ricorre al calcolo della inaffidabilità:

$$Q_{syst} = Q_1 \cdot Q_2 \cdot \dots \cdot Q_n = \prod_1^n Q_i$$

Da cui:

$$R_{syst} = 1 - Q_{syst} = 1 - \prod_1^n Q_i$$

La validità di quanto esposto è dimostrabile con il caso di 2 elementi visto sopra:

$$Q_{syst} = Q_1 \cdot Q_2 = (1 - R_{syst}) = 1 - (1 - R_1) \cdot (1 - R_2)$$

Dove:

$$R_{syst} = R_1 + R_2 - (R_1 * R_2)$$

Per quanto riguarda il tasso di guasto, nell'ipotesi in cui

$$R_1 = R_2 = e^{-\lambda t}$$

Si ha

$$R_{syst} = 2e^{-\lambda t} - e^{-2\lambda t}$$

E quindi si può dimostrare che:

$$MTBF_{syst} = \frac{3}{2}\lambda$$

2.1.10 Disponibilità dei sistemi complessi

Per il calcolo delle disponibilità di una macchina (sistema complesso) si possono utilizzare, per sistemi in serie o parallelo, le stesse formule e gli stessi schemi proposti per l'affidabilità "R", quindi:

- Sistemi in *serie* di *n-elementi*:

Definita con A_i la disponibilità dell'elemento i -esimo, la disponibilità complessiva risulta:

$$A_{syst} = A_1 * A_2 * \dots * A_n = \prod_{i=1}^n A_i$$

- Sistemi *ridondanti* di *n-elementi*:

La disponibilità globale in questo caso è favorita dal fatto che la funzione necessaria al sistema viene effettuata da più elementi la cui indisponibilità viene compensata dagli altri elementi ancora attivi:

$$A_{syst} = 1 - \prod_{i=1}^n I_i$$

Dove la quantità I_i rappresenta l'*indisponibilità* ($1-A_i$) del componente.

2.1.11 La manutenibilità

La norma UNI 9910 definisce la *manutenibilità* come *attitudine di una entità* (macchina o impianto), *in assegnate condizioni di utilizzo, a essere mantenuta o riportata in uno stato nel quale essa può svolgere nuovamente la funzione richiesta, con procedure e mezzi opportunamente specificati.*

La manutenibilità è quindi una caratteristica della macchina che dipende però anche dalle “*condizioni*” in cui viene mantenuta. In queste condizioni sono compresi, oltre alle caratteristiche progettuali, anche tutti quei fattori che integrano la macchina nell’impianto in cui essa si trova, dalla posizione fisica, all’accessibilità delle parti da riparare, al flusso di materiali e persone che la circondano abitualmente, ecc.

Esiste una relazione tra quantità MTTR, tempo medio di riparazione (inteso come tempo necessario al ritorno in servizio del sistema), che rappresenta in sintesi la manutenibilità della macchina, e la funzione di affidabilità. Poiché si era visto che:

$$A = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$$

Allora il tempo medio di riparazione *MTTR* dipende anche dal parametro di disponibilità “*A*”.

Qualitativamente, si può vedere la relazione tra le tre grandezze in un grafico:

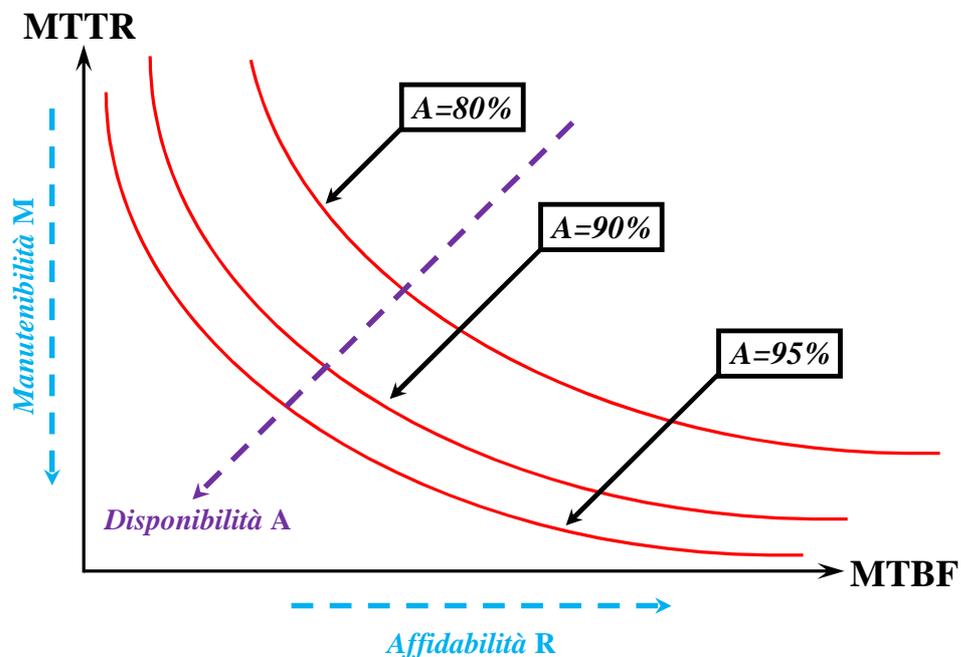


Figura 2.1.11.1 - Diagramma manutenibilità vs. affidabilità

Definito quindi un certo valore di affidabilità (caratteristica derivante dalla progettazione) e valutata la disponibilità operativa storica “*A*” come il rapporto tra il tempo di buon funzionamento

e il tempo totale di utilizzo (guasti compresi), si ottiene un valore di manutenibilità che può essere comparato con altri rilevati su macchine o impianti della stessa tipologia.

Definita ad esempio “normale” una disponibilità del componente o dell’impianto pari al 95%, e noti su base storica i tempi necessari ad intervenire per guasto (MTTR) è possibile risalire alla sua affidabilità per scopi di riprogettazione e miglioramento delle caratteristiche.

2.2 STRATEGIE MANUTENTIVE

2.2.1 La strategia della manutenzione

Un guasto è un fenomeno che, come riportato nella norma UNI 9910, consiste nella *cessazione dell'attitudine di una "entità" a eseguire la funzione richiesta*.

La manutenzione delle macchine ha due scopi principali:

- ***Riparare i guasti***
- ***Impedire la loro insorgenza***

I due aspetti vengono pertanto riferiti a due tipologie manutentive definite rispettivamente come manutenzione correttiva (per la riparazione di guasti già in atto) e manutenzione preventiva (tende pertanto ad effettuare interventi manutentivi prima che accada il guasto). Per entrambe l'obiettivo da perseguire è ridurre l'indisponibilità accidentale o sistematica che si manifesta quando gli apparati sono soggetti, durante la produzione, a usura, fatica, corrosione e in generale quando i meccanismi invecchiano e si degradano. Si vuole mettere in evidenza l'importanza dell'efficienza e della buona organizzazione di un servizio manutentivo nel contesto produttivo, in particolare laddove la linea sia satura (elevati volumi), oppure sia richiesto un elevato livello qualitativo di prodotto e di processo, oppure quando sussistano entrambe queste esigenze.

Per raggiungere l'obiettivo è necessaria una dettagliata documentazione storico-informativa che permetta una adeguata analisi dei dati riguardanti la disponibilità degli apparati, nonché i costi e l'efficienza del personale preposto a mantenere e migliorare la performance delle macchine.

Uno degli approcci più interessanti al problema del degrado degli impianti e alla loro conseguente assistenza, sembra essere la teoria che si basa sulla curva di mortalità a "*vasca da bagno*".

Si può definire *guasto istantaneo* quell'evento che non è prevedibile a priori ma che si manifesta improvvisamente, spesso interrompendo in modo totale il funzionamento della macchina; l'anomalia si verifica di norma quando la sollecitazione, comunque intesa, supera la resistenza del componente su cui è applicata.

Si riscontra pertanto che per una qualsiasi macchina che viene installata, nel primo periodo di vita utile (funzionamento), è possibile che il tasso di guasto istantaneo sia elevato. Questo fatto è causato principalmente dalle caratteristiche dei componenti che, essendo nuovi, necessitano di un "rodaggio" per l'assestamento di possibili errori di montaggio e/o regolazioni iniziali.

Ci si trova quindi in una prima zona della curva che presenta un tasso di guasto istantaneo decrescente con una velocità proporzionale alla capacità della macchina di “assestarsi” e degli operatori di imparare ad usarla correttamente.

Raggiunta una fase di funzionamento stabile, questa si protrae generalmente per un lungo periodo, nel quale compaiono guasti dovuti principalmente al degrado per normale utilizzo dei componenti. Questo è il periodo della *vita utile*, in cui il tasso di guasto è costante e la macchina funziona alla capacità normale per la quale è stata progettata e costruita.

Quando i componenti iniziano ad invecchiare, viene meno la capacità di svolgere le funzioni richieste e si iniziano a manifestare cedimenti. Ci si trova a questo punto nella zona di “usura”, caratterizzata da un tasso di guasto crescente nel tempo con una pendenza che è funzione sia dello stato della macchina (ore lavorate) che dell’utilizzo che ne viene fatto (condizioni di lavoro e carico).

La manutenzione deve lavorare affinché il tasso di guasto istantaneo rimanga il più costante possibile nel ciclo di vita del sistema, ovvero, che quest’ultimo di collochi operativamente nella zona di mortalità standard (vita utile) e affinché tale tasso sia il più basso possibile.

2.2.2 I tempi della manutenzione

La comparsa del guasto causa generalmente un decadimento delle prestazioni che può essere tanto istantaneo e totale, quanto parziale e dilazionato nel tempo. Tra il manifestarsi dell'anomalia e l'intervento della manutenzione per la riparazione, spesso trascorre un lasso di tempo detto "ritardo amministrativo" dovuto principalmente al fatto che i manutentori devono venire a conoscenza della tipologia di guasto e quindi attrezzarsi e prepararsi di conseguenza.

La norma UNI 9910 riporta i diagrammi relativi ai tempi della manutenzione, dei quali si cercherà di darne interpretazione specifica tramite diagramma seguente:

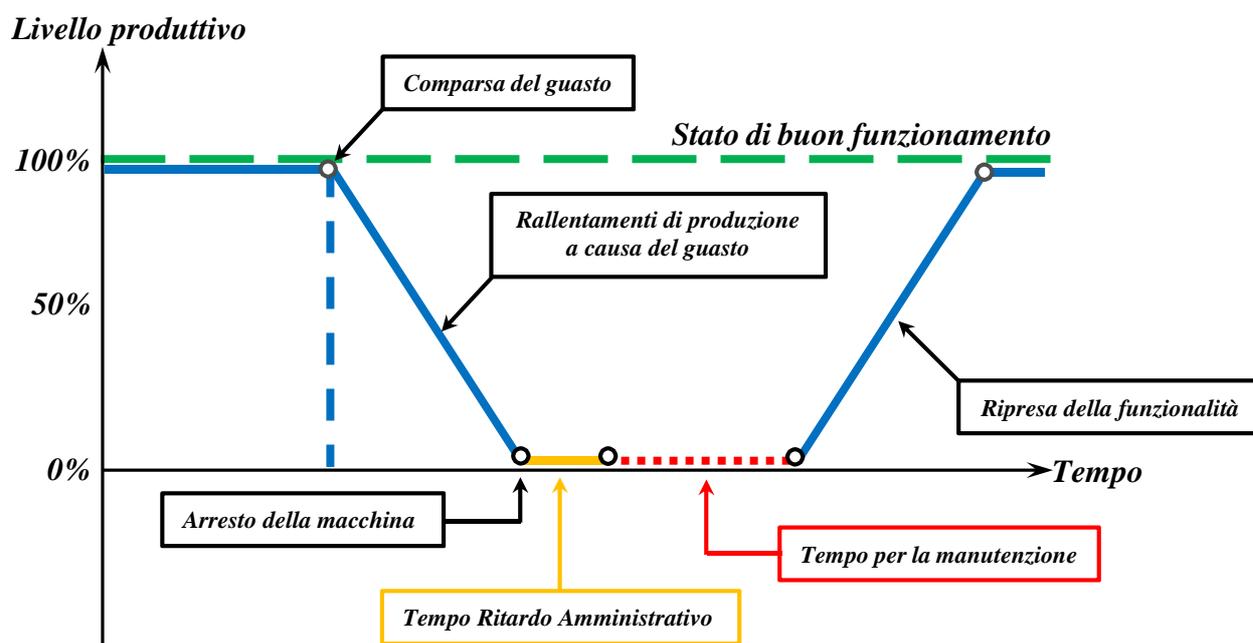


Figura 2.2.2.1 – Diagramma Livello produttivo vs. Tempo per una macchina generica

Come si può notare nel grafico qualitativo, dal momento della comparsa del guasto fino al successivo raggiungimento del livello di buon funzionamento è possibile individuare una serie di tempi relativi alla riparazione:

- **Rallentamento:** è l'intervallo di tempo in cui il sistema continua ad operare ma i processi o il suo funzionamento risultano via via rallentati o errati (i primi rallentamenti molto spesso non vengono associati ad un malfunzionamento o alla comparsa di un guasto). In questo intervallo di tempo l'operatore ha pertanto modo di constatare che la macchina presenta un guasto che sta portando l'arresto del sistema e lo segnala tempestivamente alla manutenzione.
- **Ritardo Amministrativo:** è un tempo di attesa affinché la manutenzione si attivi a causa di fenomeni di tipo amministrativo e di inoltro della richiesta a chi di competenza per quel guasto, oltre che, alla disponibilità e preparazione dei manutentori alla specifica tipologia

di intervento. Da non escludere mai la possibilità che al momento del guasto non vi sia alcun manutentore libero per effettuare l'intervento (lo stesso vale per i ricambi e le attrezzature necessarie alle operazioni di manutenzione).

- **Tempo di riparazione:** in realtà tale tempo comprende altre 4 sottocategorie:
 - **Tempo di ricerca e rilevazione dell'anomalia segnalata** → il tecnico incaricato effettua un controllo tramite diagnostica (direttamente sulla macchina) e/o tele-diagnostica (a distanza tramite comandi remoti)
 - **Tempo di approvvigionamento ricambi** → a magazzino o da fornitori
 - **Tempo di effettiva riparazione** → è il tempo necessario alla sostituzione dei componenti guasti
 - **Tempo di controllo** → prima liberare la macchina dalla manutenzione occorre effettuare alcuni controlli sulle funzionalità e test affinché sia tutto funzionante.

Il tempo di **indisponibilità della macchina** sarà quindi dato dalla somma dei tempi appena elencati; alcune quantità dipenderanno dalle capacità del servizio manutentivo, altre da fattori esterni quali i turni lavorativi, i rallentamenti burocratici o la mancanza di ricambi a magazzino. Una corretta suddivisione e il controllo di questi tempi può permettere al gestore del servizio di intervenire in modo mirato su quegli aspetti che maggiormente possono contribuire ad aumentare l'efficacia degli interventi e quindi minimizzare l'indisponibilità della macchina.

2.2.3 Le politiche manutentive

Una politica manutentiva nasce dalla realizzazione pratica di una filosofia, interpretabile come un pensiero organizzativo. La manutenzione nasce inizialmente dall'esigenza di riparare le macchine guaste per allungare la loro vita utile produttiva; allo stesso modo la necessità di una macchina di esser mantenuta nel tempo comporta di fissarne e limitarne a priori l'effettivo "sfruttamento" in azienda. Si sviluppa quindi inizialmente una politica manutentiva di tipo semplice (correttiva), la quale si basa sull'attesa che compaia un guasto e sul successivo intervento dei tecnici per la riparazione e il ripristino delle funzionalità originali.

Altre filosofie, più recenti, hanno favorito il nascere di diverse politiche di manutenzione volte a ridurre i costi e i tempi di fermo macchina. La necessità di integrare più profondamente la manutenzione nella realtà aziendale ha portato allo sviluppo di una politica di prevenzione del guasto e di quelle tecniche particolari che ne fanno a capo.

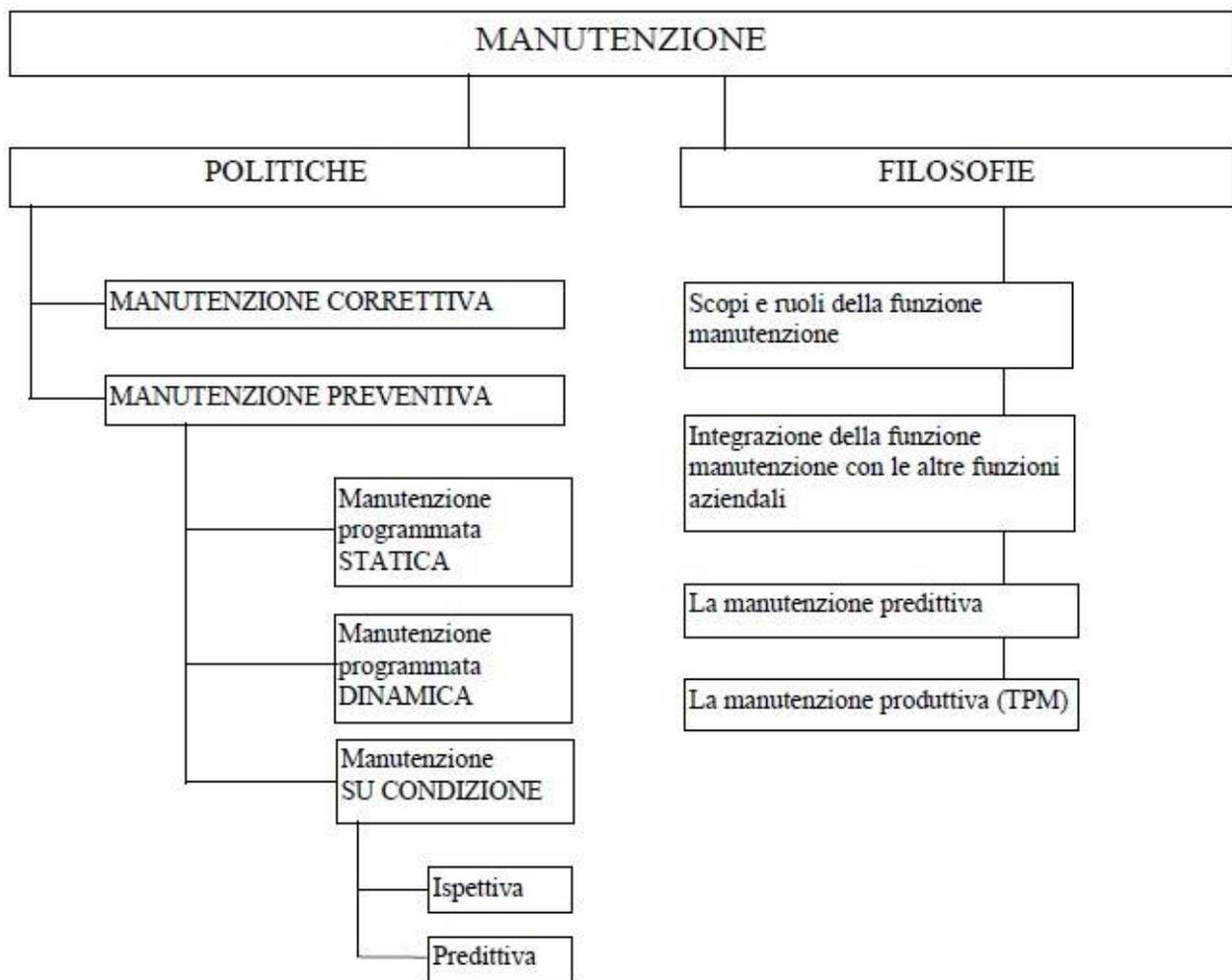


Figura 2.2.3.1 – Schema delle politiche e filosofie manutentive

In tempi più recenti si sono sviluppati approcci predittivi e produttivi della manutenzione i quali, attraverso una maggiore integrazione del servizio nella realtà aziendale hanno promosso un processo la cui tendenza è quella di ridurre gli addetti di manutenzione a favore di un maggiore addestramento alla riparazione degli operatori che utilizzano la macchina. Il manutentore vero e proprio diventa quindi una risorsa alla quale la produzione attinge solo per compiti estremamente specialistici in cui sono richieste professionalità e competenze più elevate.

Si vedranno in seguito quali sono le caratteristiche peculiari delle varie politiche adottate a livello industriale, e successivamente ferroviario, in un'ottica in cui le politiche operative non sono però nettamente separate tra loro. I confini applicativi che le dividono sono infatti dettati più dalla situazione oggettiva in cui vengono applicate dalla diversa terminologia che le contraddistingue.

2.2.4 La manutenzione correttiva

La norma UNI 9910 definisce la manutenzione correttiva come *manutenzione eseguita a seguito di una avaria e volta a riportare un'entità nello stato in cui essa possa eseguire la funzione richiesta*.

Questo modo di affrontare il problema prevede di lasciare la macchina in esercizio fintanto che il manifestarsi o il progredire di una anomalia costringe il gestore a fermare la macchina. La strategia, chiamata di **manutenzione correttiva** (o secondo altri autori, di *esercizio fino a rottura*) presenta degli aspetti contrastanti.

Il fattore positivo è un costo di manutenzione e di fermo macchina pressoché nullo fintanto che la macchina funziona. I fattori negativi possono invece esser sintetizzati in:

- Elevata perdita di ricavi dovuti al fermo della macchina per guasto
- Imprevedibilità dell'intervento e quindi delle eventuali operazioni di deviazione del flusso produttivo in corso (in ambito ferroviario occorre la sostituzione dei veicoli guasti)
- Costi di riparazione generalmente elevati poiché il guasto di un solo componente che si protrae per molto tempo può portare al danneggiamento di altri componenti della macchina.

Una strategia correttiva, che rappresenta l'approccio più tradizionale della manutenzione, conserva una sua validità qualora le tipologie di guasto siano facilmente riparabili in un contesto produttivo in cui il fermo macchina non comporti gravi danni al ciclo produttivo generale. È il caso di avarie a macchine singole ma duplicate (macchine in parallelo), il cui ruolo nel ciclo produttivo può facilmente essere ricoperto da un'altra unità.

Il suo utilizzo presenta dei vantaggi qualora la comparsa della tipologia di guasto a cui è applicata sia scarsamente prevedibile. Una manutenzione sistematica, come si vedrà in seguito, si basa sulla prevedibilità di accadimento del guasto, come nel caso di mancanza o deterioramento di olio lubrificante in un motore a combustione interna. Prevedere invece la rottura di un alternatore è più difficile e d'altra parte sostituirlo quando è ancora in buone condizioni potrebbe rivelarsi troppo dispendioso (poiché di semplicità costruttiva ma di elevato valore tecnologico).

2.2.5 La manutenzione preventiva

La manutenzione preventiva è definita come *manutenzione eseguita a intervalli predeterminati o in accordo a criteri prescritti e volta a ridurre le probabilità di guasto o la degradazione del funzionamento di una entità* (norma UNI 9910).

La politica preventiva si basa quindi sulla sostituzione programmata di un determinato componente della macchina ancora perfettamente funzionante, con uno nuovo, in modo da prevenirne il cedimento incontrollato. La programmabilità dell'intervento consente una maggiore organizzazione del lavoro di manutenzione e garantisce la possibilità di gestire la fermata della macchina nella maniera più conveniente.

All'interno della manutenzione preventiva, in base alle modalità di determinazione degli intervalli di tempo predeterminati e alla definizione dei criteri prescritti, si possono distinguere almeno tre tecniche manutentive:

- Manutenzione programmata *statica*
- Manutenzione programmata *dinamica*
- Manutenzione *su condizione*

→ Nella manutenzione programmata *statica* gli intervalli e i criteri prescritti di intervento sono generalmente fissati, a intervalli regolari o a specifici limiti di usura, per tutta la vita utile del componente o della macchina.

Esempio pratico può essere la sostituzione delle candele di un'automobile la cui cadenza chilometrica è specificata dal costruttore ed è da ritenersi valida per tutta la vita del veicolo.

→ Nella manutenzione programmata *dinamica* gli intervalli sostitutivi sono determinati in genere in base alla storia della macchina stessa. La rivelazione del tempo medio prima tra due guasti (MTBF) che spesso è funzione delle modalità con cui la macchina viene utilizzata, consente di redigere dei calendari di intervento preventivo basati su una determinata probabilità che il guasto non si manifesti nell'arco di tempo che intercorre tra due sostituzioni successive.

Appare qui chiaro che la manutenzione preventiva-programmata, per quanto finora visto, è efficace sia in termini economici che di riduzione della indisponibilità della macchina quando il guasto presenta una certa regolarità di accadimento.

Tuttavia, come già visto nel caso dell'alternatore, ad un guasto che sia difficile da prevedere non è conveniente applicare tecniche di manutenzione programmata in quanto si rischia realmente di andare a sostituire un componente la cui vita utile è tutt'altro che terminata.

2.2.6 Manutenzione su condizione

Sempre in ambito automobilistico, adottare una politica di sostituzione programmata per le pastiglie dei freni non è conveniente e tantomeno lo è, sotto il profilo della sicurezza, una politica correttiva. La soluzione generalmente adottata è quella di costatarne le condizioni di usura e prendere la decisione se cambiarle o meno: si fa quindi una manutenzione “su condizione”.

I programmi manutentivi si traducono spesso in regolari interventi di smontaggio, sostituzione e rimontaggio dei componenti. Revisioni non necessarie di macchine, intese a prevenire guasti futuri, possono talvolta provocare guasti indotti e un danno economico maggiore rispetto al permettere che la macchina funzioni fino a rottura.

La strategia di monitoraggio della condizione, effettuata mediante verifiche ispettive periodiche, tende quindi ad individuare lo stato di un componente che potenzialmente potrebbero provocare il guasto.

In un’ottica di manutenzione sempre più integrata e allo scopo di distanziare ulteriormente i periodi tra due grandi revisioni, il piano di ispezione sullo stato di una macchina o di un suo determinato componente è spesso vantaggiosamente correlato ad un programma di manutenzione programmata (dinamica) ma spesso necessita anche di un elevato grado di addestramento da parte del personale esecutore nel riconoscimento dell’anomalia.

Una manutenzione basata sul monitoraggio può consentire quindi di:

- Ridurre i costi di manutenzione
- Aumentare la disponibilità operativa delle macchine
- Migliorare la sicurezza
- Ridurre la quantità e la gravità dei guasti in esercizio

I sistemi che generalmente vengono adottati per il monitoraggio possono essere ulteriormente distinti in:

- *Sistemi continui*: i dati relativi a svariati parametri di funzionamento vengono acquisiti a intervalli regolari e piuttosto brevi (diagnostica in tempo reale di parametri funzionali della macchina). Questi sistemi sono costosi ma offrono il più alto grado di copertura nei confronti del guasto.
- *Sistemi di sorveglianza*: i dati sono rilevati a intervalli di tempo più lunghi (ad esempio nelle fasi di avvio-spegnimento).
- *Sistemi di acquisizione distributivi*: i dati vengono inviati da strumenti e apparecchiature portatili posizionati in punti di misura definiti a priori.
- *Sistemi di acquisizione manuali*: i dati vengono raccolti manualmente dagli operatori durante percorsi pianificati attraverso il parco macchine senza coinvolgere strumenti posizionati in modo stabile sulla macchina.

Il monitoraggio delle condizioni può essere definito come un metodo che indica lo stato di “salute” della macchina utilizzando parametri che evidenziano i cambiamenti avvenuti nel tempo nella macchina stessa. I criteri principali utilizzati sono:

- ✓ *Analisi acustica*: L’insorgere di rumori nuovi o variazioni di suono sul funzionamento di alcuni componenti stanno a significare un degrado che a breve potrebbe portare al cedimento.
- ✓ *Analisi termica*: La seconda forma che spesso indica un degrado del componente è la generazione di calore o l’aumento della temperatura di funzionamento a regime oltre un valore limite.
- ✓ *Analisi dei meati dei fluidi interni*: è il classico controllo dei livelli che può essere eseguito manualmente o mediante sensori; in questo caso l’associazione ad un guasto o ad un futuro guasto non è da riferirsi al livello ma alla periodicità con cui tale livello viene ripristinato. Altri indici di possibili anomalie sono l’analisi del lubrificante o del refrigerante rimosso per la sostituzione periodica, dove, colore, odore e/o la presenza di altri liquidi potrebbero significare particolari usure o cedimenti.
- ✓ *Analisi dei parametri di processo*: vengono pesate pertanto le prestazioni della macchina che se differiscono oltre una ben definita tolleranza individuano la necessità di una manutenzione accurata.

- ✓ **Analisi di corrosione:** servono ad evidenziare particolari fenomeni di usura dovuti ad un non corretto funzionamento o utilizzo della macchina, nonché a particolari condizioni di lavoro della macchina stessa (ad es. in ambienti aggressivi che vanno ad aumentare la normale usura di specifici componenti).
- ✓ **Analisi di vibrazione dinamica:** spesso legate a organi rotanti quali ingranaggi, cuscinetti, boccole ecc.
- ✓ **Termografia** (*puntiforme o distribuita*).

La manutenzione preventiva, di cui fanno parte la programmata e la manutenzione su condizione, svolge quindi un ruolo determinante nel contenere il tasso di guasto. I componenti vengono ispezionati e/o revisionati prima che avvenga il cedimento, pertanto il tasso di guasto tende a scendere sotto a quello ottenibile con la manutenzione correttiva attenendosi teoricamente ai livelli standard.

La strategia della manutenzione adottata per un determinato sistema identifica quindi il tipo e le modalità del servizio applicato. Il bilancio finale va fatto tra:

- *Spesa per sostenere la manutenzione:* sia in termini di materiali di ricambio e di consumo che del mancato utilizzo dovuta al fermo macchina per la revisione.
- *Guadagno economico:* inteso come ripristino della disponibilità della macchina che può esser utilizzata al massimo delle sue capacità.

2.2.7 La manutenzione predittiva

La manutenzione predittiva si basa sulla possibilità di riconoscere la presenza di una anomalia in stato di avanzamento attraverso la scoperta e l'interpretazione di segnali premonitori del guasto finale.

Il segnale, quando riconosciuto, entra poi a far parte di quei fattori che possono essere monitorati attraverso ispezioni continue o periodiche e quindi nella sfera di influenza della manutenzione preventiva (su condizione o programmata).

Contrariamente alla manutenzione preventiva (in particolare alla manutenzione su condizione) l'idea di base della predittiva si fonda su un controllo dello stato delle apparecchiature tale da non interrompere il loro normale funzionamento ma da segnalarne anticipatamente ed in modo continuo il progressivo degrado.

Lo scopo della manutenzione predittiva è quello di minimizzare, attraverso lo sviluppo di metodologie flessibili e affidabili di rilevamento della condizione, il numero di ispezioni o di revisioni che potrebbero a loro volta dare luogo a guasti o deterioramenti.

Tipico esempio potrebbe essere l'identificazione di una legge che correli l'aumento della temperatura di un cuscinetto e la sua vita residua.

2.2.8 La manutenzione produttiva: Total Productive Maintenance (TPM)

Una moderna visione dell'organizzazione industriale tende ad identificare la manutenzione non più come una funzione aziendale accessoria alla produzione, ma come una sua parte integrante. In quest'ottica di sempre maggiore integrazione interfunzionale si inseriscono le motivazioni che portano all'approccio della manutenzione produttiva.

I concetti di base della TPM possono esser riassunti nei tre aspetti seguenti:

1. Ottenere la massima efficienza, e quindi affidabilità dell'impianto, al fine di ridurre l'insieme di tutti i costi sostenuti nell'intero ciclo di vita utile stimata dell'impianto.
2. Mantenimento della macchina basato sulla prevenzione durante la vita utile.
3. Coinvolgere operativamente tutto il personale dell'azienda (dal top manager all'operatore di produzione).

Sostanzialmente la manutenzione produttiva utilizza le tecniche preventive allo scopo di massimizzare la disponibilità dell'impianto al minimo costo, nel corso di tutta la sua vita utile *prevedendo la partecipazione attiva di tutto il personale aziendale.*

Uno degli assunti fondamentali di questa strategia manutentiva "globale" è che le cause di inaffidabilità delle macchine sono imputabili a errori nella progettazione e nella gestione dell'impianto. Essa punta pertanto ad eliminare alcune cause di guasto che possono essere riassunte in tre categorie:

1. **Errori di progetto** → *compiuti in fase di:*
 - Progetto
 - Costruzione
 - Installazione
2. **Errori di esercizio** → *ad opera di chi utilizza la macchina*
 - Impianti tenuti in cattive condizioni
 - Errori di avviamento e/o conduzione
3. **Errori di manutenzione** → *durante l'esecuzione degli interventi di ripristino*

Come è possibile osservare, si tratta di una metodologia complessa e innovativa le cui linee di azione peculiari sono:

- Mantenimento dell'impianto nelle condizioni ottimali
- Gestire al meglio l'impianto (per il completamento del punto precedente)
- Protezione contro il deterioramento → sia in condizioni normali che gravose
- Correzione e miglioramento complessivo → contro carenze di progetto
- Prevenzione contro gli errori umani → tramite formazione e responsabilizzazione delle maestranze

La TPM prevede di raggiungere questi obiettivi attraverso:

- Introduzione della *manutenzione autonoma*
- Miglioramento delle prestazioni del servizio di manutenzione
- Svolgimento di progetti di miglioramento continuo

Benché come è possibile intravedere in quanto appena descritto, la TPM coinvolga settori aziendali diversi e si estenda ben oltre alle attività di riparazione del guasto, l'innovazione deriva soprattutto dall'introduzione della *manutenzione autonoma*.

La manutenzione autonoma può esser definita come *complesso delle attività di manutenzione e di conduzione svolte dal personale di produzione*.

Affidabilità e disponibilità vanno quindi interpretate non solo come assenza di guasti ma anche come capacità dell'impianto (inteso questa volta come insieme di uomini e macchine) di fornire prestazioni ottimali e continuative nel tempo.

La manutenzione autonoma ha lo scopo, attraverso la formazione e il coinvolgimento del personale operativo, di realizzare un sistema di gestione globale che consenta:

- Miglioramento delle prestazioni dell'impianto
- Mantenimento delle prestazioni a livelli ottimali

Le problematiche principali nell'applicazione pratica di queste teorie sono ben evidenti se si considera l'entità dello sforzo di coinvolgimento del personale aziendale a tutti i livelli. Il cambiamento delle abitudini consolidate, peraltro già in essere con l'introduzione delle filosofie preventive e predittive, viene in questo caso ulteriormente amplificato allo scopo di creare la massima integrazione possibile delle risorse tecniche e umane proprie di un'impresa industriale o di servizi.

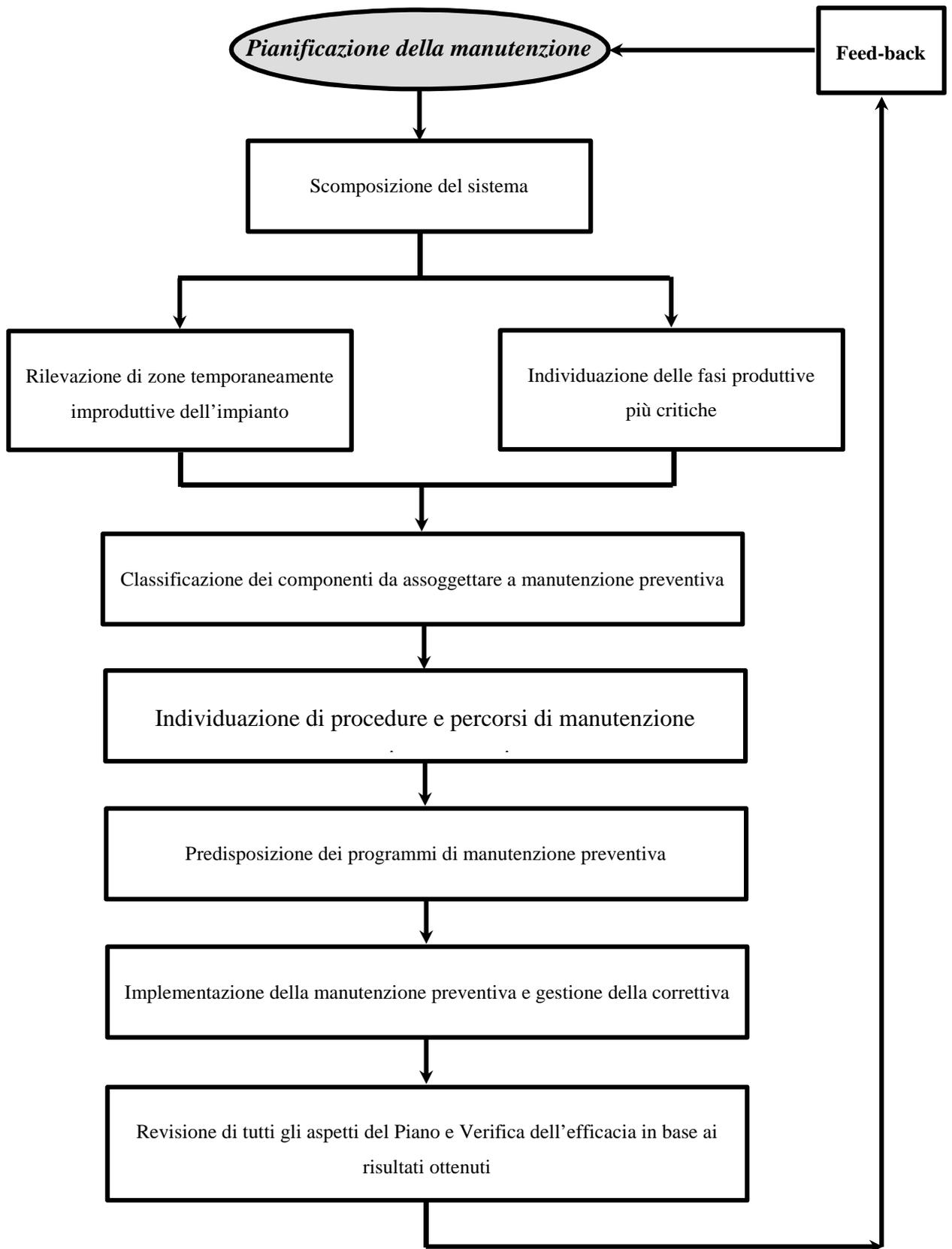
2.2.9 La pianificazione degli interventi

Assicurare e gestire un efficace servizio di manutenzione significa garantire che il sistema operi al meglio delle sue capacità. Il piano di azione deve essere supportato da quegli elementi necessari al buon funzionamento del servizio e in particolare deve individuare gli intervalli e i criteri manutentivi per un costante controllo dello stato degli apparati e dei loro componenti più critici. Questi criteri devono essere studiati in modo che non risultino né troppo onerosi in termini di tempo, e quindi denaro, né troppo superficiali da risultare inutili. Gli elementi chiave per una buona pianificazione possono essere suddivisi in:

- Strategia della manutenzione
- Grado richiesto di disponibilità dell'impianto
- Funzioni specifiche della manutenzione
- Procedure standard
- Elementi di supporto e ricambistica
- Manualistica

Il controllo e il coordinamento dei vari elementi è in genere di competenza della direzione di stabilimento e lo scopo del programma, oltre a quello già menzionato di incrementare la disponibilità delle macchine, è quello di attribuire dei ruoli formalmente definiti al servizio di manutenzione. Noti gli obiettivi aziendali si possono personalizzare gli interventi in funzione delle esigenze della produzione.

Il diagramma che segue mette in luce alcuni aspetti di pianificazione del servizio che, partendo da una prima stesura, con la suddivisione e l'individuazione di quei settori da assoggettare a diverse politiche manutentive, prevede la predisposizione e l'applicazione di programmi e procedure operative adatte allo scopo. Un aspetto di grande rilevanza consiste nella possibilità (e nella volontà) di procedere con una continua revisione critica del piano stesso in funzione dei risultati conseguiti nell'ottica di migliorare continuamente le prestazioni della manutenzione.



2.3 LA MANUTENZIONE DEI ROTABILI

2.3.1 Considerazioni generali

Il materiale rotabile ferroviario, come tutti i mezzi meccanici e le attrezzature utilizzate per l'esercizio di qualsiasi azienda, ha bisogno di essere mantenuto efficiente, onde prevenire il verificarsi di guasti o deperimenti, e garantire quindi sia la regolarità e la sicurezza dell'esercizio, sia il confort dei viaggiatori e l'integrità delle merci trasportate, sia il mantenimento e la salvaguardia nel tempo del patrimonio-materiale rotabile.

Non devono trascurarsi inoltre tutti quei fattori che ne influenzano l'aspetto esteriore, quali la pulizia e il decoro, nonché l'armonia dell'arredamento interno dei locali viaggiatori e la presentazione esterna dei mezzi.

E' indispensabile perciò organizzare la manutenzione del materiale.

In effetti, almeno teoricamente, ogni azienda potrebbe decidere di intervenire solo a posteriori, e cioè dopo che l'avaria si sia verificata, prevedendo quindi esclusivamente interventi di riparazione, od al contrario programmare un sistema di manutenzione preventiva basata su visite e revisioni periodiche, allo scopo di prevenire il manifestarsi di avarie ed eliminare le anomalie prima che esse diano luogo ad inconvenienti che potrebbero pregiudicare la regolarità e sicurezza dell'esercizio e/o risultare economicamente onerosi.

La scelta fra due estreme possibilità od il ricorso ad una soluzione intermedia dipende ovviamente dalla natura dell'azienda, dal tipo di attività svolto e da considerazioni di carattere economico: è evidente che, tenuto conto dell'alto grado di sicurezza e regolarità voluto nell'esercizio ferroviario, la seconda alternativa è quella che viene normalmente adottata, pur non trascurando la probabilità, comunque esistente, del verificarsi di avarie accidentali, e la necessità quindi di disporre interventi a posteriori per la riparazione di tali guasti.

2.3.2 Tempo e fatica

L'attuazione pratica dei concetti esposti in precedenza trova diversa estrinsecazione secondo il tipo di rotabile a cui si applica; usure, consumi e deperimenti dei vari organi possono infatti dipendere essenzialmente da due motivi:

1. Tempo trascorso
2. Entità del lavoro compiuto

Può ritenersi che il tempo influisca prevalentemente sotto l'aspetto del deperimento, mentre il lavoro compiuto agisca invece come produttore di usure e consumi degli organi in movimento e a mutuo contatto. In generale tempo e fatica influiscono contemporaneamente, con maggiore incidenza dell'uno o dell'altro a seconda dei casi: di massima potrebbe affermarsi che la seconda ha influenza prevalente sugli organi meccanici, mentre il primo agisce soprattutto per gli altri aspetti del materiale.

Nella determinazione del distanziamento delle riparazioni o revisioni sono stati eseguiti pertanto i due criteri, a tempo e a lavoro compiuto, tenendo conto della rispettiva prevalenza caso per caso, ma senza però trascurare l'aspetto economico del problema: l'aderenza infatti dell'attuazione dei criteri suddetti ai casi reali non è solo questione tecnica, ma ha importanti riflessi economici per la ripercussione sulla entità e frequenza delle revisioni e riparazioni, e quindi sui costi di manutenzione e riparazione, e sull'utilizzazione del materiale. Va inoltre tenuto in conto che non sempre riesce agevole o possibile determinare il lavoro compiuto da un rotabile mentre è sempre possibile e facile determinare il tempo trascorso da una precedente revisione o riparazione.

Per quello che riguarda il parco rotabile Trenitalia può dirsi che il criterio delle scadenze a tempo è dominante nel campo dei veicoli, mentre nel caso dei mezzi di trazione i due sistemi si intrecciano, con prevalenza però di quello che tiene conto del lavoro compiuto dal rotabile.

2.3.3 Criteri di riparazione del materiale rotabile

Si consideri il caso di un rotabile nuovo che inizia il suo ciclo di lavoro in esercizio: con l'uso si manifestano complessivamente deperimenti, usure, consumi, per cui sorge la necessità di intervenire con adeguati provvedimenti per limitarli e mantenere il mezzo nelle condizioni atte a dare buon rendimento assicurandone la funzionalità.

Usure e consumi dipendono dalla durata di funzionamento e dall'impiego fattone, ossia dal lavoro più o meno pesante ad esso richiesto, ma non si verificano con ritmo analogo per tutti gli organi bensì in diversa funzione del loro modo di lavorare: non solo ma, per i vari organi sono tollerabili in esercizio limiti di consumo e di usure differenti. Ne viene che le necessità di riparazioni non si verificano ad uguali intervalli di lavoro o di tempo per tutti gli organi o pezzi, ma per ciascuno a scadenza diversa.

D'altra parte è da tener presente che, spesso, per riparare un pezzo occorre procedere allo smontaggio di parecchi organi con esse collegati, per cui, per criteri economici, conviene, quando è possibile, cumulare la riparazione di più parti collegate quando si smonti un determinato organo o pezzo che importi molto lavoro di smontature: può altrimenti avvenire che per riparare un pezzo si sia costretti a togliere d'opera, e magari riparare, parti che hanno subito riparazioni da brevissimo tempo e che potrebbero durare a lungo in servizio, col risultato di un scarso rendimento di utilizzazione della riparazione (e relativa spesa) precedentemente fatta.

Inoltre è da aggiungere che se si dovesse riparare ogni organo appena presenta usure, consumi o guasti, indipendentemente dagli altri, si sarebbe evidentemente costretti a fermare il rotabile ogni volta si presenti questa eventualità, col risultato che ogni momento sarebbe tolto dal servizio, con tutti i disturbi, scarse utilizzazioni e maggior bisogno di riserve che ne conseguono.

Da questo insieme di considerazioni deriva tutto il criterio di organizzazione delle riparazioni: eseguire a mano a mano che se ne presenta la necessità, tutte le riparazioni che non sono procrastinabili perché o rendono inutilizzabile il mezzo o ne compromettono la sicurezza; accentrare tutte le altre riparazioni necessarie in determinati complessi di riparazione.

Fissati questi punti, rimangono da determinare le entità di tali complessi di riparazioni ed il loro distanziamento.

2.3.4 Il sistema di manutenzione preventiva in ambito ferroviario

La necessità di offrire un servizio di trasporto sempre più intenso ed efficiente ha indotto la necessità di fissare in campo manutentivo visite e interventi ai mezzi ben definiti e opportunamente intervallati al fine di massimizzare la sicurezza di esercizio e ridurre al minimo i tempi di fermo dei rotabili; Il sistema di riferimento è quello del gruppo F.S. degli anni '80 articolato nei seguenti punti:

- **Visite ai rotabili:** Per i mezzi di trazione è il personale di macchina che provvede ad effettuare le visite tecniche, sia in fase di partenza, per accertarsi che il mezzo esca dal deposito locomotive in normale efficienza, sia in arrivo, per rilevare le eventuali anomalie che possono essersi verificate durante il viaggio, da segnalare al deposito per l'adozione dei provvedimenti necessari. Essendo tali visite obbligatorie, il periodo lavorativo del PdM comprende i tempi necessari per la loro esecuzione (definiti come "tempi accessori" al servizio).

La visita del materiale rotabile trainato viene invece affidato, secondo turni programmati, ad agenti specializzati detti *verificatori* che prestano servizio in specifici posti di verifica dislocati in determinate stazioni (o impianti) scelte in relazione all'importanza del movimento veicolare. Compito dei verificatori è l'accertamento affinché i veicoli non presentino avarie o anomalie tali da pregiudicare la loro regolare circolazione ed utilizzazione e di eliminare, compatibilmente con i mezzi di cui dispongono ed il tempo di sosta del materiale, le anomalie di più modesta entità da essi constatate. I verificatori devono anche controllare che i veicoli non siano *scaduti di revisione* o altra visita periodica e, per i carri merci, controllare la regolarità del carico che, in caso di anomalie, dovranno darne immediato avviso e disporre quanto possibile in propria competenza affinché venga mantenuta la regolarità e la sicurezza dell'esercizio. Nel caso in cui venga constatato un inconveniente, il verificatore è tenuto ad applicare al veicolo una specifica etichetta, per la segnalazione al personale interessato alla utilizzazione e alla circolazione del materiale l'esistenza dell'anomalia e le limitazioni che ne derivano.

- ***Manutenzione corrente:***

Per i mezzi di trazione consiste nel complesso di piccoli interventi di manutenzione, la cui effettuazione si rende necessaria per eliminare le anomalie che il PdM riscontra nell'uso della locomotiva, e che vengono eseguiti nel corso dell'esercizio, durante le soste di turno dei mezzi in deposito.

Per i veicoli trainati le piccole riparazioni di manutenzione corrente vengono effettuate sui piazzali e, nei limiti delle possibilità, dallo stesso personale di verifica, eventualmente coadiuvato da tecnici specializzati, distaccati presso i posti di verifica, oppure organizzati in vere e proprie postazioni di manutenzione corrente. Per avarie di maggiore entità, non eliminabili con i mezzi a disposizione, le riparazioni di manutenzione corrente vengono eseguite nelle Squadre Rialzo.

- ***Revisioni e riparazioni periodiche:***

Per far fronte alle usure ed al consumo di alcune parti del materiale rotabile, vengono programmati lavori di revisione e riparazione di tipo periodico sulla base dei chilometri percorsi e dal tempo trascorso tra una revisione e l'altra. In sostanza si tratta quindi dell'esecuzione di un determinato complesso di operazioni di manutenzione, specificate in dettaglio in appositi ordinativi permanenti sui quali vengono indicate l'ordine di successione ed il tempo assegnato, con cui vengono eseguite, indipendentemente dalle richieste del P.d.M. (per i mezzi di trazione) o dei verificatori (per i veicoli rimorchiati), nelle officine di deposito o nelle Squadre Rialzo, togliendo il rotabile dal servizio secondo turni di revisione prestabiliti. In tal sede trovano posto però anche tutte le riparazioni, già richieste dal personale addetto alla esecuzione delle visite, o che si siano rese necessarie nel precedente turno di servizio, non riscontrate inderogabili dagli incaricati dell'officina di manutenzione e che pertanto non vengono eseguite in sede di manutenzione corrente ma rimandate alla successiva revisione di turno (detta ***RT***).

- **Riparazioni cicliche:**

Sono gli interventi più completi che si eseguono sul materiale rotabile e possono essere di vario grado dove quelli di maggiore importanza sono le cosiddette “*Grandi Riparazioni*”. Esse comportano un insieme di operazioni di notevole entità, programmate pure in appositi ordini permanenti, richiedenti attrezzature particolari ed importanti per la loro esecuzione, per cui di massima, sono appannaggio di impianti specializzati definiti “*Officine Grandi Riparazioni*”.

È possibile, in relazione alle conoscenze tecniche e statistiche, prevedere la durata economica in servizio, senza necessità di riparazioni, dei vari organi, o meglio dei vari complessi di organi: in questo modo si può provvedere ad un raggruppamento di essi secondo la presumibile durata, sia questa a tempo o a entità di lavoro.

Nel definire i criteri di riparazione e lavorazione è di fondamentale importanza che i vari organi vadano riuniti in gruppi di durata compatibile in esercizio: per l'economia del ciclo di riparazione occorre infatti che ciascun organo duri per l'intervallo previsto, che se per esso programmata, in base alle condizioni tecniche e di esercizio, la sola revisione in occasione di grande riparazione, esso dovrà essere tecnicamente idoneo a durare fino alla successiva riparazione ciclica, sotto pena di dover fermare prima il mezzo, per ripararlo, con danno economico evidente.

Per i mezzi di trazione una grande riparazione comporta il completo smontaggio di tutte le parti meccaniche, elettriche, pneumatiche, ecc., e la pratica rimessa a nuovo. Tra due grandi riparazioni (**RG**) sono inserite altre “*cicliche*” di entità diverse, a seconda del tipo di mezzo di trazione: i **riordini (Rr)** e le **riparazioni meccaniche generali (RGm)** per le locomotive elettriche, le **revisioni (R)** per le locomotive diesel e automotrici termiche, le **visite intermedie (Vis)** per le automotrici elettriche.

I cicli e le durate degli intervalli vengono misurati, per semplicità in chilometri percorsi, ritenendosi ad essi proporzionali i consumi dei vari organi, e sono naturalmente diversi tra i vari gruppi di mezzi di trazione, e ciò, ovviamente, in relazione al tipo di servizio che essi sono adatti a compiere, alle loro caratteristiche e alla loro complessità.

Per i veicoli trainati la periodicità delle riparazioni cicliche, le così dette **Rev**, è stabilita sulla base del tempo in cui essi sono restati in servizio, e si diversifica in funzione del tipo e delle caratteristiche del veicolo. Anche per essi però consistono in una serie di smontaggi, visite, prove e riparazioni, di vario grado ed entità, aventi lo scopo di accertarne lo stato di

manutenzione e metterli in condizione di durare in servizio senza bisogno di interventi radicali, fino alla successiva riparazione ciclica.

2.3.5 Il problema dell'entità e distanziamento delle riparazioni cicliche

La determinazione dell'entità e del distanziamento delle riparazioni cicliche è compito precipuo dell'organizzazione del Servizio Materiale e Trazione.

Di norma si tende a rendere gradualmente più lunghi gli intervalli tra riparazioni cicliche successive; è però da tener conto che la loro più opportuna determinazione deve tener conto:

- Della durata tecnica di ciascun organo di servizio;
- Della tendenza alla progressiva esaltazione delle usure, consumi e deperimenti; indipendentemente dai guasti tecnici veri e propri infatti, superati certi limiti di usure i vari organi decadono rapidamente, deteriorandosi a tal punto da non essere più riparabili o riutilizzabili, e le conseguenze si manifestano con accrescimento rapido del deterioramento di altri organi ad essi accoppiati o collegati, così da rendere assai più onerose le riparazioni;
- Dall'accrescimento progressivo degli oneri di manutenzione al crescere delle usure, consumi e deperimenti, accrescimento rapidissimo quando si va oltre certi limiti;
- Della necessità, di contro, di utilizzare convenientemente la spesa della precedente riparazione ciclica.

Ci si trova quindi di fronte al problema di minimo costo del complesso riparazioni cicliche e manutenzioni, sul quale influiscono non solo operazioni fatte a distanza di tempo in impianti diversi, ma anche le caratteristiche di uso dei vari rotabili.

La soluzione di questo complesso problema tecnico-economico, passa attraverso l'esame dei singoli elementi che comprendono:

- Rendere minimi i costi di produzione, qualunque sia il lavoro da compiere;
- In funzione di essi studiare la più opportuna ripartizione dei lavori occorrenti, tra manutenzione e vari gradi di riparazione ciclica; l'alternanza ed il distanziamento più opportuni tra essi, che rendano a loro volta minimo, il costo complessivo del ciclo di operatività del rotabile.

Questo dunque l'aspetto economico, che però deve subordinarsi alle condizioni tecniche necessarie per garantire l'efficienza continuativa del rotabile in servizio.

Una volta determinata per ciascun tipo di rotabile la più economica situazione di equilibrio, occorre seguire le variazioni continue degli elementi che la influenzano, per mantenersi costantemente su tale linea, sia pure con le insopprimibili oscillazioni intorno ad essa. È ovvio che vi sarà un inevitabile sfasamento in ritardo dei provvedimenti rispetto all'andamento reale, in quanto tali provvedimenti devono adottarsi in base a risultati consuntivi e statistici di sufficientemente lunghi periodi di tempo. D'altra parte, data l'importanza del problema e le ripercussioni che le diverse soluzioni possono avere, occorre procedere con cautela, partendo da presupposti sicuri e cioè da prudenzialmente limitati intervalli tra successive riparazioni cicliche, per avvicinarsi, dal basso progressivamente ai valori di maggiore convenienza.

2.3.6 Pianificazione, coordinamento generale del lavoro e programmi di riparazione

Da quanto precede risulta dunque evidente che, attraverso lo studio statistico e tecnico del problema delle riparazioni è possibile preventivare, con una certa attendibilità, l'entità dei vari gradi di riparazione e quindi la mano d'opera occorrente per ciascuna, almeno mediamente: in funzione di queste conoscenze si possono predeterminare la durata di ogni riparazione ciclica (in cui il rotabile è sottratto dal servizio), studiare mezzi, attrezzature, ed organizzazione per renderla minima, studiare e provvedere i fabbisogni di personale, officine, mezzi, attrezzature e materie occorrenti per affrontare il carico di lavoro che ne risulta. Ciò fatto è allora possibile una pianificazione delle riparazioni, prevedendo come dovrà utilizzarsi la disponibilità di lavoro di ciascun impianto e del complesso di essi, quali rotabili dovranno esser assegnati per riparazioni cicliche a ciascun impianto commisurando l'entità del lavoro assegnato alla disponibilità singola di produzione, consentendo così alle unità interessate di predisporre la propria organizzazione tempestivamente.

Tale programma, predisposto ed approvato prima in sede locale, e successivamente dalla sede Centrale del Servizio Trazione, viene elaborato semestralmente, con sufficiente anticipo.

Si procede pertanto come segue:

Ciascun deposito locomotive, in base alla percorrenza media mensile di ciascuna unità in dotazione ed al distanziamento tra due riparazioni cicliche successive, rileva quali unità matureranno la percorrenza stabilita nel semestre interessato; rimangono così definiti il numero, l'entità ed il fabbisogno di mano d'opera, oltre che del periodo di scadenza delle riparazioni cicliche.

D'altro lato viene rilevato il totale delle ore semestrali di mano d'opera disponibili nelle officine (al netto delle ore di assenza media e delle unità lavorative che non concorrono direttamente alla produzione) per la manutenzione e la riparazione dei mezzi di trazione.

Detraendo da tale dato le ore occorrenti per la manutenzione corrente, calcolate in base alle presumibili percorrenze semestrali delle varie unità, si ha la disponibilità di mano d'opera per le riparazioni cicliche. Mediante coordinamento e in relazione alle diverse specializzazioni, può ripartirsi il carico generale di riparazioni cicliche, saturando prima le disponibilità delle officine dei depositi locomotive e quindi passando alle Officine F.S. di Grande Riparazione, cui vengono riservate le riparazioni di maggiore entità oltre ad alcune lavorazioni accentrate.

Con analoghi criteri viene suddiviso tra Squadre Rialzo e Officine Grandi Riparazioni, il carico di lavoro risultante dai programmi di riparazione dei veicoli, per scadenze periodiche di *revisioni* o *riparazioni*.

Le rimanenti necessità costituiscono il programma delle riparazioni da assegnare eventualmente all'industria privata.

Naturalmente le possibilità degli impianti non vengono saturate totalmente, lasciando sempre una certa riserva per gli imprevisti, rappresentati dalle riparazioni occasionali o speciali conseguenti ad incidenti od inconvenienti di esercizio. Inoltre, non potendosi a priori evitare divergenze tra previsioni induttivamente fatte e l'andamento reale, è prevista, in sede centrale, una azione di controllo, per realizzare un adeguamento continuo dei programmi all'andamento reale, in dipendenza delle necessità che via via si manifestano o mutano.

2.3.7 Gli impianti di riparazione

Gli impianti che provvedono alle riparazioni dei rotabili, sono le Officine dei Depositi locomotive e le Officine di Grande Riparazione per i mezzi di trazione; le Squadre Rialzo ed ancora le Officine di Grande Riparazione per i veicoli (materiale rimorchiato).

Una certa parte sono seguite, come anticipato, anche dall'industria privata (in aumento).

- ***Officine dei Depositi Locomotive:***

Effettuano normalmente la manutenzione corrente, le revisioni di turno e, a seconda dei casi, un certo numero di riparazioni cicliche, in genere di piccola e media entità, dei mezzi di trazione. Ciò è dovuto al fatto che dovendo dette Officine proporzionare mezzi e mano d'opera alle esigenze del lavoro di manutenzione dei periodi di punta, ove non venisse loro assegnato un lavoro complementare, quale quello di un certo carico di riparazioni cicliche, vedrebbero le loro maestranze ed i mezzi disponibili scarsamente utilizzati nei periodi di lavoro normale o di basso impegno nell'attività di manutenzione.

- ***Squadre Rialzo:***

Provvedono alla revisione ed alla riparazione dei veicoli trainati, nonché alla esecuzione degli interventi di manutenzione corrente non eseguibili dai verificatori o nei posti di manutenzione corrente. Esse possono essere specializzate per la riparazione dei carri, delle carrozze, ovvero di entrambi i tipi di veicoli.

- ***Officine di Grande Riparazione:***

Sono specializzate ciascuna per la riparazione di tipi di rotabili omogenei: locomotive elettrice, locomotive diesel, elettromotrici, automotrici, carrozze ecc... In alcune di esse vengono accentrate, per ragioni tecniche ed economiche, le riparazioni di organi particolari e le lavorazioni speciali che, in genere, richiedono un alta specializzazione.

Tale specializzazione nell'utilizzazione delle Officine per il conseguimento di una produzione uniforme, deriva da evidenti ragioni di carattere economico ed organizzativo: minori scorte di materiale, semplificazione dell'organizzazione, migliore addestramento e specializzazione del personale e quindi migliore livello delle lavorazioni meccaniche.

Non tutto il materiale rotabile viene riparato presso le Officine F.S. in quanto si è sempre seguito la direttiva di affidare parte del lavoro all'industria privata, in modo da subsidiare l'attività delle Officine F.S. nei settori dove si è riconosciuto di poter affidare a privati la riparazione del materiale in questione.

Nella ripartizione dei carichi di lavoro l'orientamento è quello di affidare alle Officine F.S. le riparazioni che richiedono un grado più elevato di specializzazione (mezzi di trazione, carrozze di tipo moderno, carri speciali dotati di apparecchiature particolari).

2.3.8 L'organizzazione del lavoro negli impianti riparatori

Lo schema organizzativo degli impianti di riparazione del materiale rotabile si basa sulla suddivisione dei compiti in due settori principali: organizzazione ed esecuzione del lavoro.

Si è inteso in tal modo operare una prima e netta distinzione tra chi deve organizzare il lavoro e chi deve invece eseguire il lavoro stesso; in particolare le varie branche, che nel caso di impianti di dimensioni ridotte possono anche essere raggruppate tra loro, assolvono i seguenti compiti:

1. **Organizzazione - 1^a parte:** *spoglio ed emissione ordinativi di lavoro*

Ha il compito di esaminare gli organi dei rotabili da riparare, determinare il lavoro da eseguire e passare l'ordinazione del lavoro agli esecutori. Subito dopo l'introduzione del rotabile in officina, occorre cioè rapidamente definire le riparazioni necessarie a ciascun organo, in base alle prescrizioni tecniche, emettere gli ordinativi di lavoro ed avviarli ai reparti di lavorazione.

2. **Organizzazione - 2^a parte:** *controllo e collaudo*

Ha il compito di controllare che i lavori ordinati siano stati regolarmente eseguiti e, nel contempo, che i lavori da eseguire siano stati ordinati secondo le prescrizioni.

3. **Organizzazione - 3^a parte:** *predisposizione piani di lavoro e coordinamento generale*

Ha il compito di studiare e predisporre i programmi semestrali di lavoro e di curarne la pratica attuazione, controllando e coordinando la progressione delle varie lavorazioni, le giacenze dei rotabili, le varie scadenze, ecc...

4. **Organizzazione - 4^a parte:** *approvvigionamento e fornitura materiali*

Ha il compito di gestire il magazzino di officina curando il tempestivo rifornimento dei materiali occorrenti

5. **Organizzazione - 5^a parte:** *studio e perfezionamento*

Ha il compito di studiare cicli di lavorazione, i posti di lavoro, le attrezzature, i mezzi ecc. al fine di migliorare in genere il rendimento dell'impianto. Esamina anche le proposte di variazione dei tempi, di tariffa ed ha, infine, l'incarico di curare la prevenzione infortuni.

6. Esecuzione - 1^a parte: esecuzione delle lavorazioni ai rotabili

Ha il compito di eseguire i lavori secondo gli ordinativi ricevuti e secondo i piani stabiliti segnalando, eventualmente, le varianti necessarie. La branca in oggetto è suddivisa, a seconda degli impianti, in due o più reparti di lavorazione a loro volta suddivise in squadre di operai dei vari mestieri.

7. Esecuzione - 2^a parte: manutenzione, attrezzi, macchinari e mezzi d'opera

Ha il compito di provvedere alla manutenzione degli attrezzi, del macchinario, dei mezzi d'opera ecc. di tutto l'impianto. È evidente che lo schema organizzativo descritto, trova, in pratica, applicazioni diverse a seconda delle dimensioni dell'impianto.

2.3.9 La pulizia del materiale rotabile

L'organizzazione di un efficiente servizio di pulizia dei rotabili è una necessità non solo dal punto di vista delle esigenze del pubblico, ma anche dal punto di vista delle esigenze del pubblico, ma anche dal punto di vista della migliore conservazione del materiale.

Il servizio di pulizia viene effettuato in impianti appositamente attrezzati, laddove esistono, sugli stessi binari di sosta dei treni viaggiatori, e nei depositi locomotive per alcuni rotabili (automotrici termiche, elettriche, ecc...). La pulizia dei mezzi di trazione è legata invece al programma di revisioni e riparazioni cicliche cui tali mezzi vengono sottoposti.

Il servizio di pulizia, nelle varie zone della rete F.S., è quasi completamente affidato ad imprese private, in base ad un regolare contratto di appalto, e si svolge secondo il programma che viene stabilito dai competenti Uffici Materiale e Trazione.

Per la pulizia dei veicoli eseguita sui piazzali e binari di stazione, il programma può prevedere:

- **Pulizia ordinaria o normale:** Ha per scopo di porre i veicoli, in tutte le loro parti più importanti, in soddisfacenti condizioni di igiene e decoro, tali da corrispondere alle normali esigenze del pubblico viaggiante; richiede pertanto un notevole grado di accuratezza.
- **Pulizia sommaria o ridotta:** È volta prevalentemente ad assicurare soddisfacenti condizioni di igiene e decoro a tutte quelle parti del veicolo che si trovano a più diretto contatto con il pubblico. A queste parti pertanto la pulizia si deve eseguire con grande cura, mentre per le altre è sufficiente anche un minor grado di accuratezza. Viene di solito effettuata al termine di ciascun viaggio, ai treni per i quali non è prevista pulizia normale.
- **Pulizia sommaria o di transito:** Viene di regola eseguita ai treni durante la loro sosta nelle stazioni intermedie di viaggio. Essa prevede pertanto l'esecuzione di poche e semplici operazioni, compatibili con la durata della sosta e la presenza di viaggiatori nei veicoli.

Completano il quadro, il lavaggio esterno delle casse, e le pulizie straordinarie periodiche (radicali, disinfezioni, disinfettazioni, ecc...), eseguite nelle Squadre Rialzo e nelle Officine in occasione delle revisioni periodiche.

2.4 ANALISI DI WEIBULL

2.4.1 Introduzione alla stima della legge di affidabilità

Lo scopo del capitolo è quello di presentare una metodologia ben consolidata in letteratura per determinare la funzione di affidabilità più appropriata di un'entità. La metodologia d'analisi è fondante per la proposta di lavoro di questa tesi, e sarà la base attraverso la quale condurre un'analisi dei dati di guasto e successive scelte di ottimizzazione tecnica ed economica.

In generale, esistono due approcci per affrontare il problema:

1. *L'uso di funzioni di distribuzione empiriche* – Si stima la funzione di affidabilità mediante il “fitting” dei dati esistenti sul ciclo di vita della macchina. Nello specifico, si ripete esattamente lo stesso procedimento proposto nel capitolo 2, per il calcolo della legge di affidabilità in un dominio di tempo discreto (si veda il capitolo 2, paragrafo 1.3, "Affidabilità"). Si calcolano cioè i valori di affidabilità $R(T)$ per ciascun intervallo in cui è stato suddiviso il calendario operativo della macchina, dopodiché si ricorre all'analisi di regressione, oppure a un altro metodo di “fitting” (ad esempio il metodo dei minimi quadrati), ottenendo così la legge di affidabilità. Questo è l'approccio seguito quando si ha a disposizione un numero sufficiente elevato di dati.
2. *L'uso di funzioni di distribuzione analitiche* – Attraverso un campionamento statistico, si stimano i parametri che definiscono opportuni modelli analitici di distribuzione di guasto che vanno ad approssimare la reale funzione di affidabilità. Quest'approccio si usa quando i dati a disposizione sono pochi. Inoltre necessita che siano ben definiti gli intervalli di confidenza per conoscere la precisione con cui suddette funzioni approssimano il reale andamento dei dati.

Per identificare i due tipi di approccio si utilizzerà per comodità la notazione “*approccio 1*” e “*approccio 2*”. Nello sviluppo del caso pratico che conclude il progetto, si farà ricorso al secondo tipo di approccio. Il prosieguo del capitolo è pertanto principalmente dedicato a spiegare come funziona l’approccio basato sulle funzioni di distribuzione analitiche. In tal senso, nel campo dell’ingegneria della manutenzione, è noto che i dati reali del ciclo di funzionamento, guasto e manutenzione dei veicoli ferroviari, sono ben approssimati, a seconda della fase di vita operativa in cui si trovano, attraverso una delle seguenti funzioni analitiche:

- 1) Esponenziale (fase di rodaggio/mortalità infantile);
- 2) Weibull (tutte le fasi della vita di una macchina);
- 3) Normale (fase di vita utile).

Attualmente l’analisi di Weibull risulta di gran lunga il metodo più utilizzato per generare un modello formale matematico, a partire da dati di manutenzione. In primo luogo, ciò è dovuto al fatto che la distribuzione di Weibull può rappresentare i guasti di componenti che presentano un comportamento normale, esponenziale, o di altro tipo, semplicemente variando il valore dei suoi parametri definiti come:

- $\theta = \text{Parametro scala}$
- $\beta = \text{Parametro forma o parametro di usura}$

Le funzioni normale ed esponenziale si applicano invece a fasi specifiche della vita operativa di una macchina.

Per spiegare il metodo di Weibull nel dettaglio, si vedrà in primis una dissertazione teorica sulla distribuzione di Weibull, precisando il significato dei suoi parametri, quindi si passerà a spiegare la necessità di utilizzare il metodo della “classifica media” (median rank) per calcolare il valore della distribuzione cumulata di guasto $F(t)$ e il modo di procedere nel caso in cui i dati di guasto censurati siano significativi.

2.4.2 Definizione e significato dei parametri caratteristici della distribuzione di Weibull

Nel capitolo 2.1.4 si era definita l'affidabilità nel continuo di una macchina mediante la funzione integrale:

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

La relazione tra il tasso di guasto e il tempo, espressa dalla funzione $\lambda(t)$, assume forme distinte in relazione al tipo di macchina in questione, rendendo la sua integrazione spesso estremamente complicata da risolvere. Pertanto anche nell'ipotesi di conoscere l'andamento di $\lambda(t)$, in alcune occasioni non sarà comunque possibile valutare $R(T)$ in forma analitica, secondo la relazione scritta sopra.

Per risolvere tale problema ci vengono in aiuto le funzioni di distribuzione analitiche. Ai fini dello studio la distribuzione di maggiore interesse è quella di Weibull. In tal senso, si può dimostrare che la relazione che lega l'affidabilità R al tempo t , può essere scritta nella forma:

$$R(T) = e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\theta}\right)^\beta}$$

Questa funzione, detta appunto distribuzione di Weibull, fu sviluppata per la prima volta dal ricercatore svedese Walodi Weibull per ragioni di studio della fatica dei metalli. In questo caso viene definita da tre parametri di cui due precedentemente anticipati:

- 1) $\beta \rightarrow$ *Parametro di forma*
- 2) $\theta \rightarrow$ *Parametro di scala*
- 3) $\gamma \rightarrow$ *parametro di origine*

È opportuno sottolineare che, la distribuzione così scritta, presenta tre importanti caratteristiche (che la rendono la più popolare tra le e funzioni analitiche che approssimano la legge di affidabilità di una macchina):

- a) La prima è già stata citata nella parte introduttiva, ossia con un'unica funzione si può rappresentare gli andamenti della propensione al guasto che caratterizzano le tre fasi della vita operativa di una generica macchina (“curva a vasca da bagno”):
 - I. Decrescente con il funzionamento;
 - II. Aleatorio;
 - III. Crescente per usura.
- b) I parametri che si ottengono realizzando il ‘fitting’ della curva di Weibull sono significativi rispetto la modalità di guasto della macchina.
- c) Anche partendo da campioni molto piccoli, si possono ottenere buone stime della legge di affidabilità di una macchina, così come buone previsioni sui guasti futuri.
- d) Infine, per il suo ‘fitting’ nelle applicazioni pratiche si possono utilizzare tecniche grafiche facili da maneggiare (carta probabilistica di Weibull).

Si consideri ora l’espressione della funzione $R(t)$ secondo la distribuzione di Weibull, ossia:

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\theta}\right)^\beta}$$

Tal espressione può essere ricondotta all’equazione di una retta attraverso un procedimento analitico che si basa sull’eseguire due volte il logaritmo della stessa. Si tratta di una proprietà che viene utile quando, si cercheranno i parametri della funzione di Weibull che meglio approssima i dati di guasto. Per prima cosa va ricordato che:

$$F(t) = 1 - R(T) = 1 - e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\theta}\right)^\beta}$$

Che si può scrivere altresì come:

$$1 - F(t) = e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\theta}\right)^\beta}$$

Facendo il reciproco di entrambi i membri:

$$\frac{1}{1 - F(t)} = e^{\left(\frac{t-\gamma}{\theta}\right)^\beta}$$

Facendo il logaritmo di entrambi i membri:

$$\ln\left\{\frac{1}{1 - F(t)}\right\} = \left(\frac{t - \gamma}{\theta}\right)^\beta$$

Facendo il logaritmo di entrambi i membri una seconda volta:

$$\ln \left\{ \ln \left(\frac{1}{1-F(t)} \right) \right\} = \beta \cdot \ln(t - \gamma) - \beta \cdot \ln(\theta)$$

Per comodità, si ricorre alle seguenti sostituzioni:

$$\begin{cases} y = \ln \left\{ \ln \left(\frac{1}{1-F(t)} \right) \right\} \\ b = -\beta \cdot \ln(\theta) \\ t' = (t - \gamma) \\ x = \ln(t') \\ a = \beta \end{cases}$$

Si ottiene così l'equazione di una retta, $y = ax + b$, con pendenza pari a β e che taglia l'asse delle ascisse (dove $y = 0$) quando $F(t) = 0,632$. Dimostriamo l'ultima affermazione.

Ponendo $y = 0$ si ha che:

$$\ln \left\{ \ln \left(\frac{1}{1-F(t)} \right) \right\} = 0 \leftrightarrow \ln \left(\frac{1}{1-F(t)} \right) = 1 \leftrightarrow \frac{1}{1-F(t)} = e^1 \leftrightarrow F(t) = 0,632$$

Chiamiamo allora con \tilde{t} il valore di t tale che $F(t = \tilde{t}) = 0,632$

Inoltre, quando $\ln \left\{ \ln \left(\frac{1}{1-F(t)} \right) \right\} = 0$ vale anche:

$$\beta \cdot \ln(\tilde{t} - \gamma) - \beta \cdot \ln(\theta) = 0 \leftrightarrow (\tilde{t} - \gamma) = \theta$$

Pertanto:

$$F(\tilde{t}) = 0,632 \leftrightarrow \tilde{t} - \gamma = \theta$$

È possibile sfruttare quanto appena visto per fare alcune precisazioni sul significato dei parametri γ, β, θ .

- Il parametro γ rappresenta il tempo di vita garantita, cioè il minimo valore di tempo per cui si garantisce la sopravvivenza della macchina con probabilità del 100%, e compare in quei modelli di deterioramento in cui i guasti non si producono fino a che non sia trascorso un tempo significativo pari a γ .

In questo caso il tasso di guasto $\lambda(t)$ è nullo fino all'istante γ dopodiché inizia a variare.

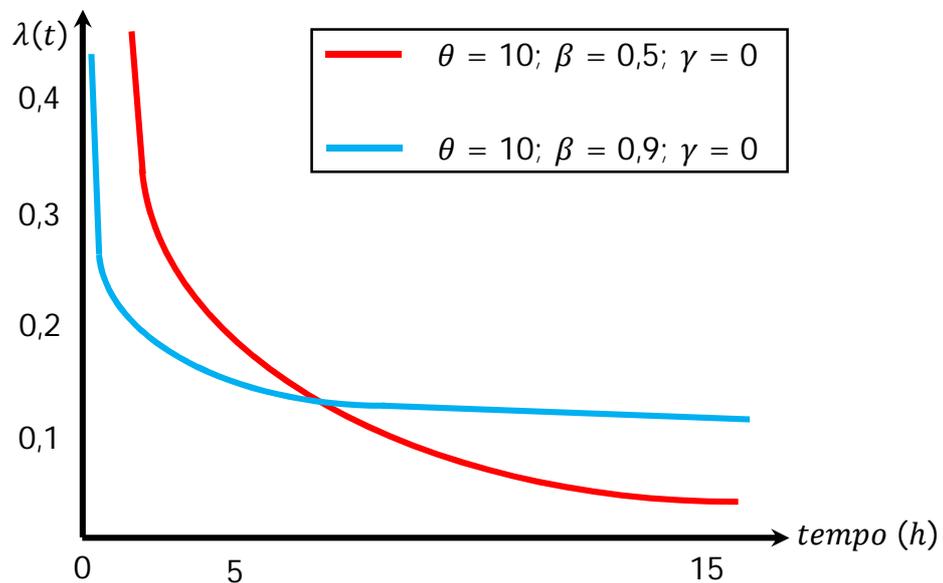
- Il fattore di forma β caratterizza la forma della funzione di Weibull ed è una misura del tipo di guasto:
 - I. $\beta < 1$: modalità di guasto di rodaggio (o di mortalità infantile);
 - II. $\beta = 1$: modalità di guasto aleatorio (esponenziale negativa);
 - III. $\beta > 1$: modalità di guasto d'invecchiamento per usura (sebbene per $1 < \beta < 3$ convive con la modalità aleatoria).

- Il parametro di scala θ (anche detto vita caratteristica) è l'intervallo di tempo che intercorre tra il tempo di vita garantita γ e l'istante in cui ci si aspetta che l'entità si sia guastata con il 63,2% di probabilità (ossia $\tilde{t} - \gamma = \theta \leftrightarrow F(t) = 0,632$). Se si assume invece che $\gamma = 0$ (cioè non esiste un tempo minimo di vita garantita), θ sarà pari al tempo del ciclo di vita della macchina entro cui la stessa si sarà guastata con probabilità del 63,2% (ossia $\tilde{t} - \gamma = \theta \leftrightarrow F(t) = 0,632$).

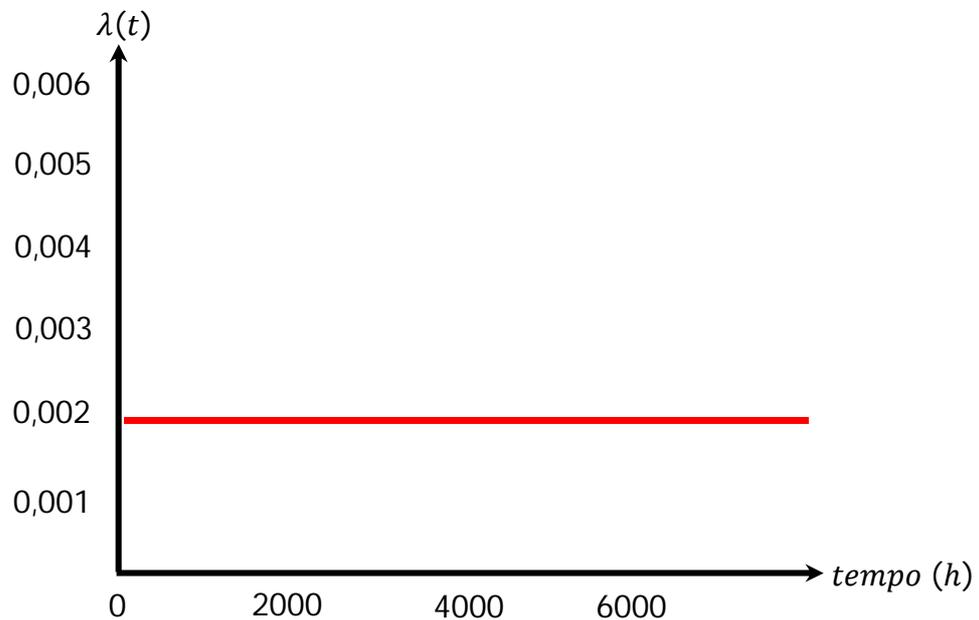
Facendo riferimento al caso generale della “curva a vasca da bagno” presentato nel capitolo 2.1.4, si mostra a continuazione il tipo di distribuzione di Weibull che si deve adottare in ogni tappa del ciclo di vita di una macchina e gli andamenti della stessa al variare dei parametri β, θ, γ (figure 1, 2, 3).

In tal senso, si possono fare le considerazioni di seguito riportate:

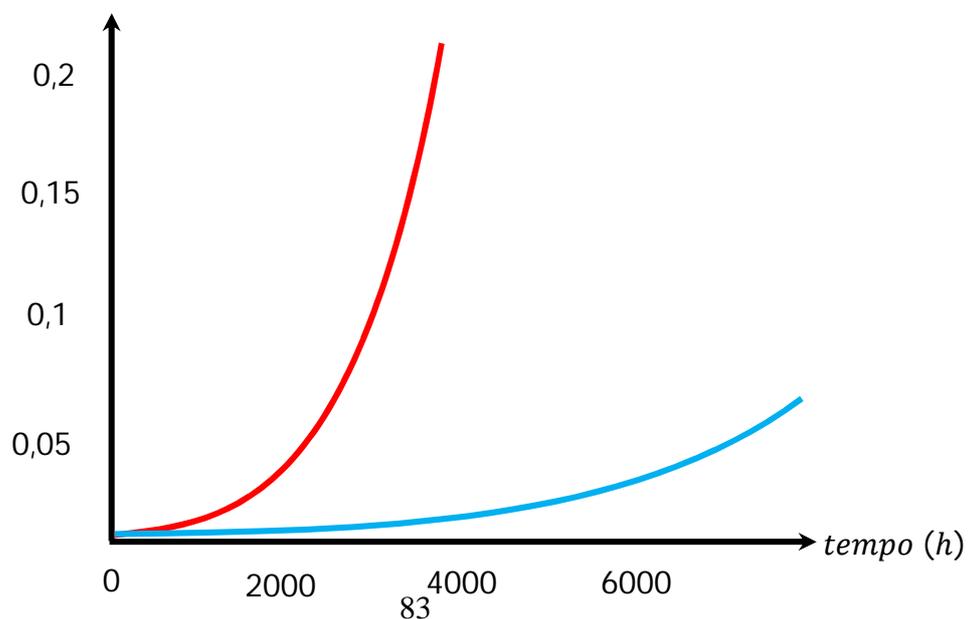
- I. La fase iniziale di mortalità infantile è espressa da una funzione di Weibull con $\beta < 1$ (vedi figura sotto). In questa fase è desiderabile che il fattore θ sia piccolo, in modo che l'eventuale mortalità infantile emerga rapidamente. Inoltre, in questa fase, i valori di β che tendono a uno, corrispondono a una situazione nella quale il fenomeno della mortalità infantile tende a sparire.



- II. La fase di vita utile è espressa da una funzione di Weibull con $\beta = 1$; in questo caso la funzione di Weibull si riduce alla curva di distribuzione esponenziale, che è caratterizzata da una tasso di guasto costante e pari a $1/\theta$.



- III. La fase finale di degrado per usura è espressa da una funzione di Weibull con $\beta > 1$. In questa fase, si vuole che il fattore di scala θ abbia un alto valore, in questo modo la crescita del corrispondente tasso di guasto si distribuisce su una scala temporale più lunga. In quanto al fattore β , l'ideale sarebbe che avesse un valore ridotto. Infatti, a valori di β elevati corrispondono, a pari valore del fattore θ (che identifica la scala temporale), una rapida crescita del tasso di guasto (nella figura 3 si può comprovare come, a pari θ , la crescita della funzione di Weibull con $\beta = 3,5$ è più pronunciata rispetto quella della curva con $\beta = 2,5$).



CAPITOLO 3. Manutenzione preventiva in assenza di dati

Sulla base della teoria esposta nei capitoli precedenti ci si pone ora nella condizione in cui non siano noti, agli enti manutentivi, dati riguardanti i tempi di cedimento o di sostituzione preventiva di componenti.

La valutazione quindi dell'*MTTF* ottimale viene pertanto ottenuta andando a valutare una serie di elementi che inizialmente devono esser stimati utilizzando valori che derivano da esperienze pregresse o da componenti simili.

Dato che si suppone di esser sempre nella condizione in cui $\lambda(t)$ non è costante (stiamo quindi facendo riferimento al campo di usura per invecchiamento), occorre far riferimento alla teoria di Weibull che, riprendendo quanto discusso nel capitolo precedente, specifica che:

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

L'affidabilità del componente quando il cedimento avviene per eccessiva usura viene pertanto comandata da due parametri chiave, già definiti come:

- $\theta = \textit{parametro scala}$ → Serve a normalizzare l'*MTTF* in funzione del tempo
- $\beta = \textit{parametro forma}$ → Definisce quanto è soggetto ad usura il componente

Da prestare particolare attenzione al valore di β poiché:

- $\beta = 1 \rightarrow \lambda(t) = \textit{cost.} \rightarrow \text{Cedimento in vita utile} \rightarrow \theta = \textit{MTTF} = \frac{1}{\lambda}$
- $\beta < 1 \rightarrow \text{Cedimento in fase di "mortalità infantile"}$
- $\beta > 1 \rightarrow \text{Cedimento per usura}$

Ponendoci pertanto nel caso in cui il componente debba concludere il suo utilizzo a causa di eccessiva usura occorre porsi anzitutto nella condizione di $\beta > 1$.

L'assunzione di tale condizione permette di fissare a questo punto il tasso di guasto $\lambda(t)$ pari a:

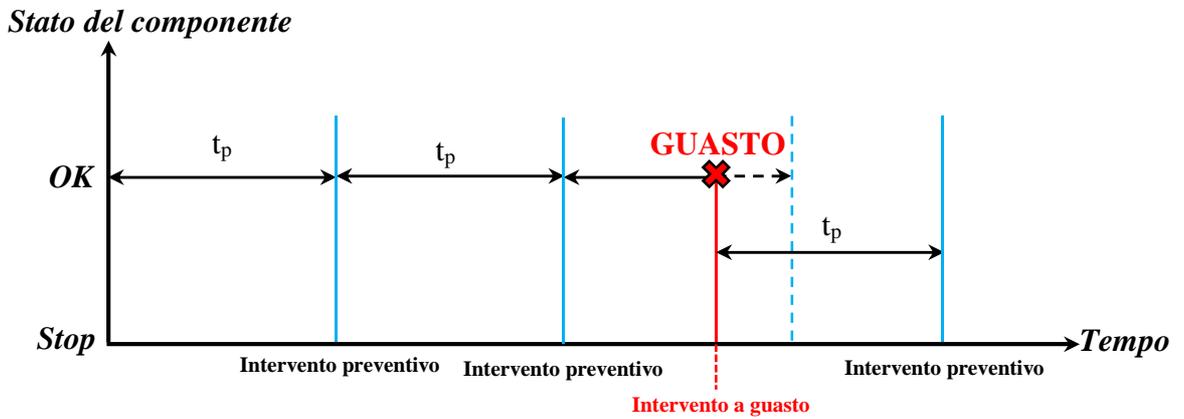
$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\theta} \left(\frac{t}{\theta}\right)^{\beta-1}$$

Viene a questo punto introdotta la strategia che verrà utilizzata per ottenere un tempo di rottura *MTTF* ottimale al fine di ridurre al minimo il costo unitario atteso per quel specifico componente definito con il termine di "UEC(t_p)".

I metodi per ricavare i costi unitari attesi sono due e vengono definiti di seguito.

3.1 $UEC(t_p)$ Type I: Age-Based Replacement Policy

In questa strategia si effettua un intervento di sostituzione “*as-good-as-new*” del pezzo/componente dopo un tempo t_p di funzionamento ottenendo quanto segue:

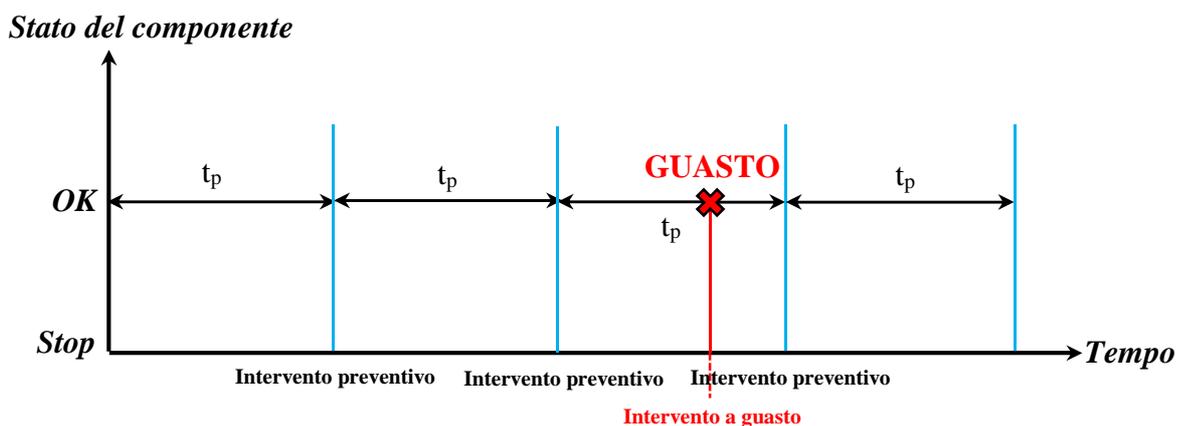


Come raffigurato, effettuare sostituzioni o riparazioni regolari dopo un tempo preventivo t_p comporta che in caso di guasto l'intervento successivo viene a posizionarsi sempre dopo t_p dal guasto.

Si specifica che t_p è un valore strettamente legato all' $MTTF$: minore è il valore di t_p e maggiormente ridotto sarà l' $MTTF$ (manutenzioni più frequenti e costi superiori).

3.2 $UEC(t_p)$ Type II: Constant-Interval Replacement Policy

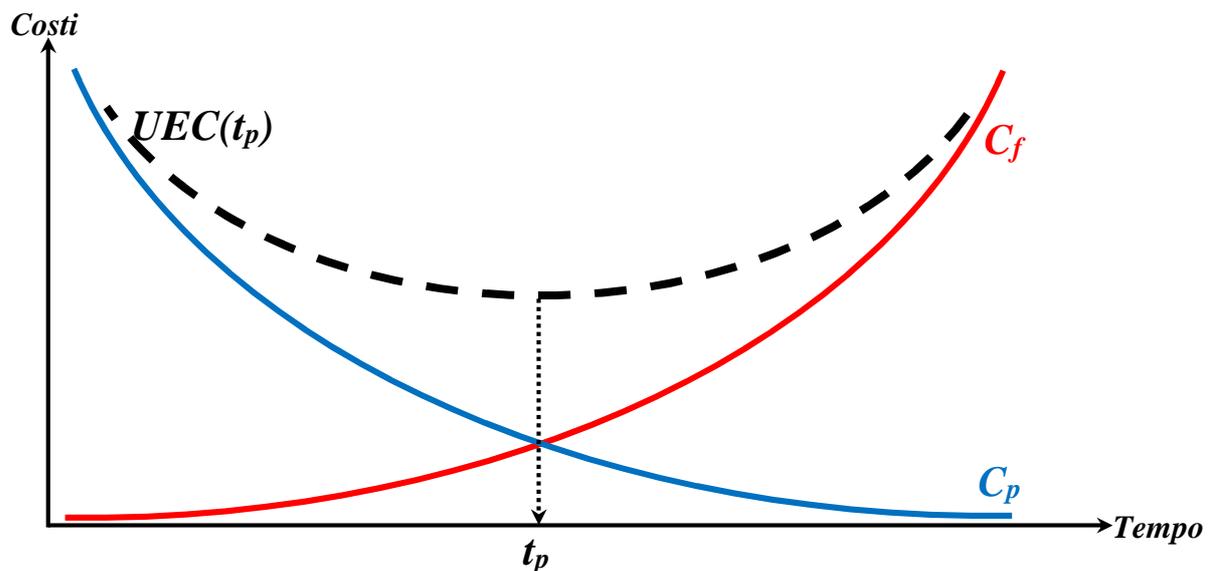
Differisce leggermente dal caso precedente poiché per tale politica, in caso di guasto, il pezzo/componente viene ripristinato ma viene comunque mantenuta la cadenza di sostituzione preventiva; questo tipo di manutenzione è spesso legata a interventi manutentivi definiti su specifiche visite tecniche che devono essere effettuate a priori dopo un certo numero di ore di lavoro o km di percorrenza.



3.3 Definizione dei costi di preventiva C_p e costi di guasto C_f

A questo punto viene automatico chiedersi quanto e come debba esser dimensionato il tempo di manutenzione preventiva t_p : il dimensionamento viene effettuato sulla base del costo unitario atteso $UEC(t_p)$ il quale viene definito come somma delle varie voci di costo sostenuti per la manutenzione e più precisamente tramite la somma di:

- C_p = Costo di intervento nel caso di manutenzione preventiva
- C_f = Costo di intervento in caso di guasto



C_f e C_p vengono a loro volta suddivise nelle seguenti voci di costo specifiche:

- *Costi di manodopera* → Costo orario di ogni singolo operatore → C_{Op} [€/h]
- *Costo del ricambio* → $C_{Ricambio}$ [€/pz]
- *Costo del fermo produttivo* → C_{Fermo} [€/h]
- *Costo di utilizzo di attrezzature particolari* → Dipendono dal noleggio o consumo di particolari attrezzature necessarie alla sostituzione/ripristino del componente → $C_{Attrezzi}$ [€]
- *Costi di preparazione della manutenzione preventiva* → Spesso legati a costi di gestione ordini ricambi, allo smontaggio di alcuni componenti e a controlli che vengono effettuati dagli operatori sulla macchina → $C_{Prep Manut}$ [€]

- *Costi generali di struttura* → Possono esser dovuti alla necessità di noleggiare o spostare la macchina da mantenere in locali specifici opportunamente attrezzati per le operazioni manutentive richieste → $C_{Struttura}$ [€]

Facendo fede anche a quanto riportato nel paragrafo 2.2.2 riguardo ai tempi di manutenzione si ottiene che a livello generale è possibile considerare i costi così composti:

$$C_p = C_{Ricambio} + (N_{Operatori} \cdot MTTR_{Preventivo} \cdot C_{Operatore})$$

$$C_f = C_{Ricambio} + (N_{Operatori} \cdot MTTR_{Guasto} \cdot C_{Operatore}) + (C_{Fermo} \cdot MTTR_{Guasto})$$

3.4 Equazioni dei Costi Unitari Attesi $UEC(t_p)$

Nota la composizione delle due tipologie di costo sulla base dell'intervento manutentivo necessario è possibile a questo punto definire le equazioni dei costi unitari:

$$UEC(t_p)_{Type I} = \frac{C_p \cdot R(t_p) + C_f [1 - R(t_p)]}{\int_0^{t_p} R(t) dt}$$

$$UEC(t_p)_{Type II} = \frac{C_p + C_f \int_0^{t_p} w(t) dt}{t_p}$$

Nel caso della "type II" compare la funzione $w(t)$ che dipende principalmente dalla velocità di rottura del componente.

Se la velocità di rottura è molto elevata si parla di "minimal repair" e pertanto è possibile associare a $w(t)$ la seguente espressione:

$$w(t) = \lambda(t)$$

Si ha pertanto che $w(t)$ è pari al tasso di guasto $\lambda(t)$ del componente che in questo caso avrà una tendenza a crescere rapidamente con l'aumentare del tempo.

A livello di calcolo tale affermazione può esser tradotta come:

$$w(t) = \lambda(t) = \frac{1}{10 - t}$$

Dove t è l'istante temporale, tra una manutenzione preventiva ed un'altra, in cui si effettua il calcolo del costo unitario atteso.

Dato che l'obiettivo è la minimizzazione del costo unitario atteso, occorrerà che per entrambe le equazioni dell' $UEC(t_p)$ valga:

$$UEC(t_p)_{Type I} \rightarrow \frac{d UEC_I(t_p)}{dt} = 0$$

$$UEC(t_p)_{Type II} \rightarrow \frac{d UEC_{II}(t_p)}{dt} = 0$$

Il problema fondamentale a questo punto è che $R(t_p)$ non è facilmente integrabile e ciò comporta che anche la derivata $\frac{d UEC(t_p)}{dt} = 0$ non presenta una soluzione semplice da trovare.

La soluzione che pertanto minimizza il costo unitario atteso la si ottiene tramite un processo iterativo che alle volte può esser ricondotto a dei grafici di supporto come:

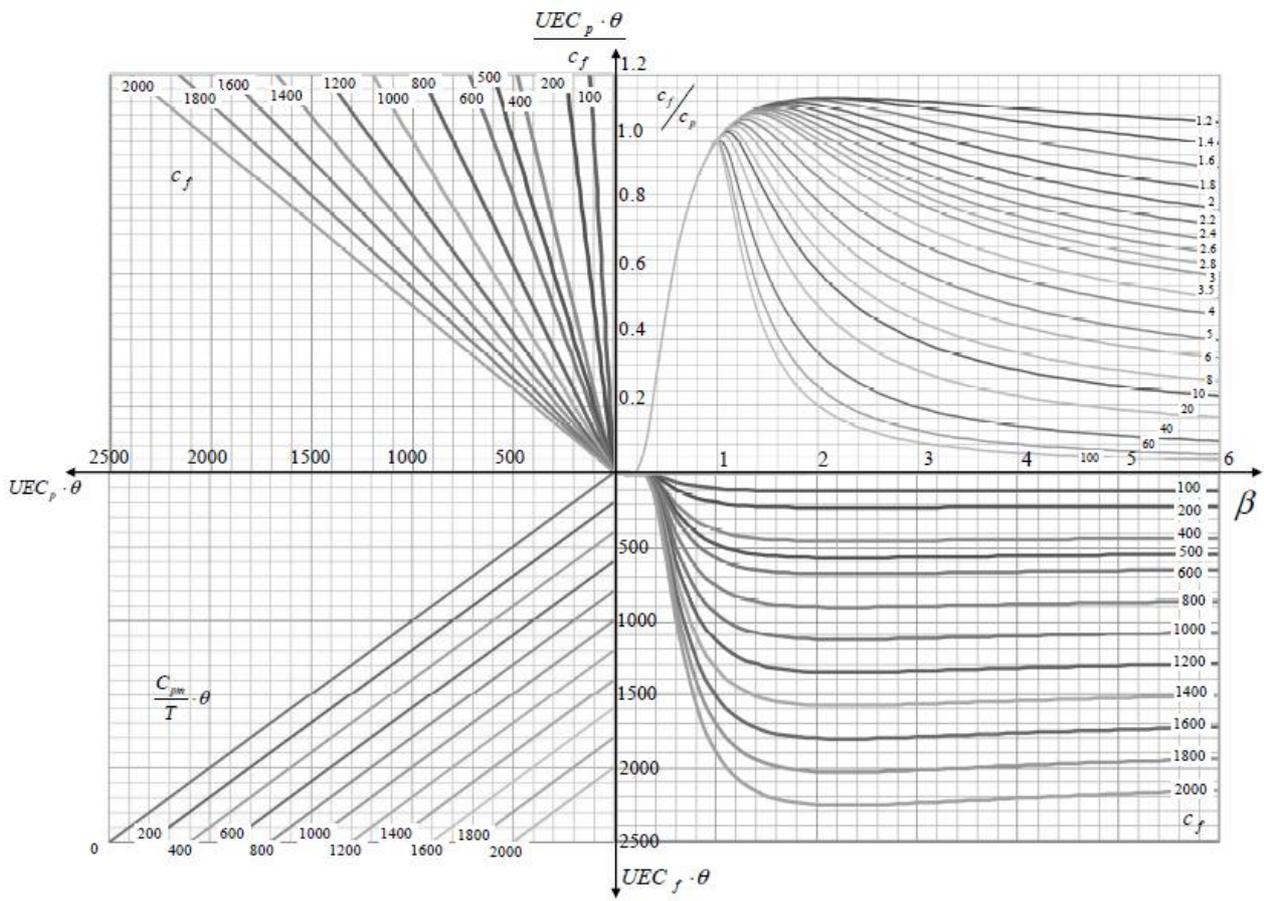


Figura 3.4.1 – Abacus per la valutazione degli UEC(t_p) al variare dei parametri β , θ , C_f e C_p

Allo stesso modo sono stati studiati gli andamenti di t_p/θ al variare di C_f/C_p in base al parametro di forma β :

$$\frac{t_p^*}{\theta} = f\left(\beta; \frac{C_f}{C_p}\right)$$

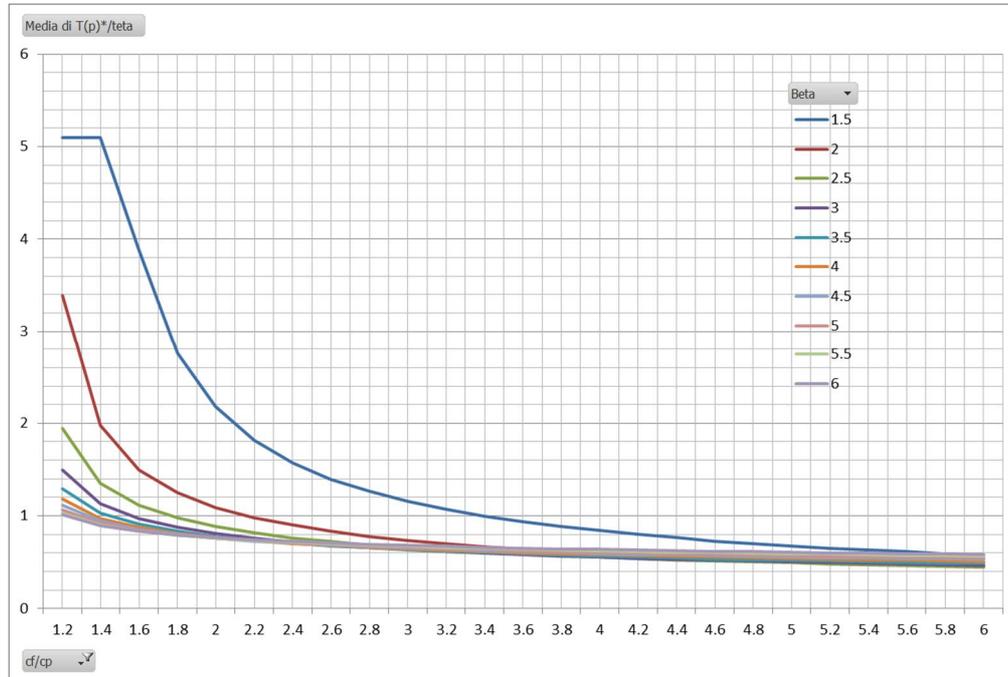


Figura 3.4.2 – Andamento $(t_p^*)/\theta$ per $1 < \frac{C_f}{C_p} < 6$

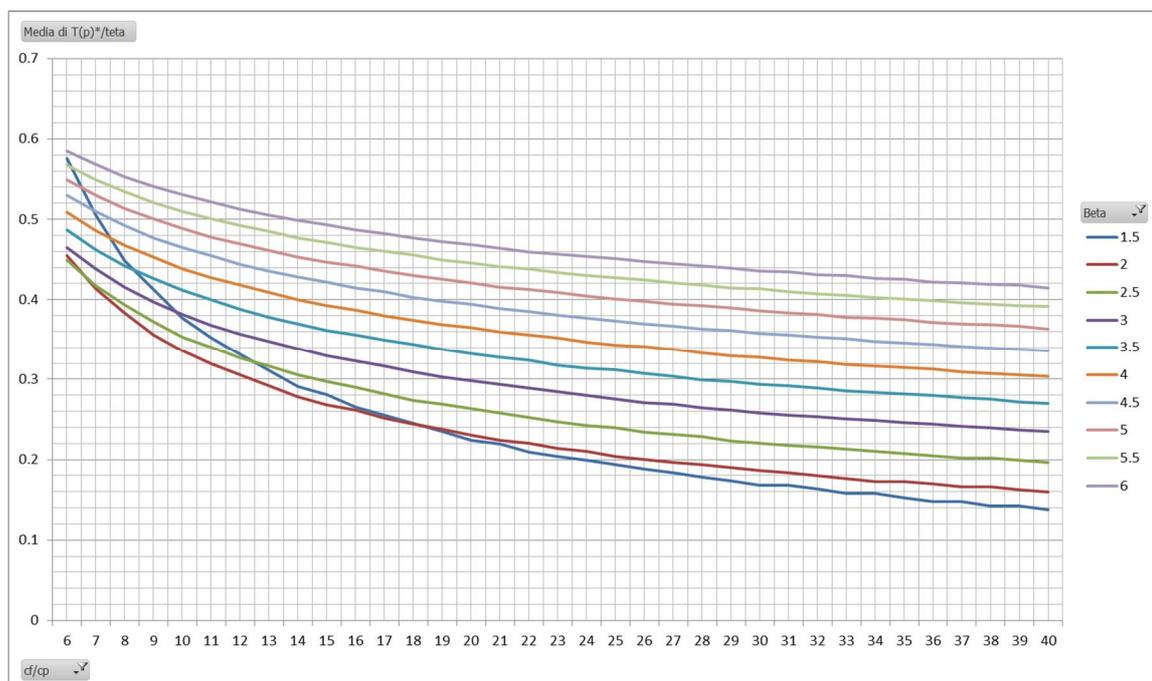


Figura 3.4.3 - Andamento $(t_p^*)/\theta$ per $\frac{C_f}{C_p} > 6$

Abbiamo pertanto una serie di variabili linearmente dipendenti le une dalle altre, in particolar modo $UEC(tp)$ e t_p possono esser ricavati andando a variare i due parametri θ e β .

3.5 Calcolo dell'UEC(t_p) minimo

Dato che la condizione imposta è quella di definire la cadenza manutentiva ($MTTF$) che minimizzi i costi $UEC(t_p)$ in assenza di dati, non è pertanto possibile pensare di utilizzare già dal primo momento i diagrammi appena presentati a maggior ragione per la mancanza di un ben definito β e θ .

Per comprendere al meglio ciò di cui abbiamo bisogno si elencano i seguenti passaggi:

$$F(t) = 1 - R(t)$$

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

$$\lambda(t) = \frac{1}{MTTF}$$

$$\text{Per } \beta > 1 \rightarrow \lambda(t) = \left(\frac{t}{\theta}\right)^\beta = \frac{\beta}{\theta} \left(\frac{t}{\theta}\right)^{\beta-1}$$

Pertanto si ottiene che:

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

$$MTTF = \frac{1}{\lambda(t)} = \frac{\theta}{\beta} \left(\frac{t}{\theta}\right)^\beta = \frac{\theta}{\beta} \cdot \ln R(t)$$

Le equazioni appena elencate sono quanto definito precedentemente dalla teoria di Weibull e, la dipendenza intrinseca di $R(t)$ che viene a generarsi per il calcolo dell' $MTTF$ e dell' $UEC(t_p)$, comporta la necessità di operare per iterazione; ponendo t_p tendente a infinito ($t_p \rightarrow \infty$) si otterrà per convergenza il valore con cui si vuol cadenzare la manutenzione del componente con la minima spesa.

L'iterazione va fatta quindi andando a variare l'istante temporale t_p il cui valore ottimale, definito con t_p^* , verrà considerato in corrispondenza del minimo del costo unitario atteso.

Dato che:

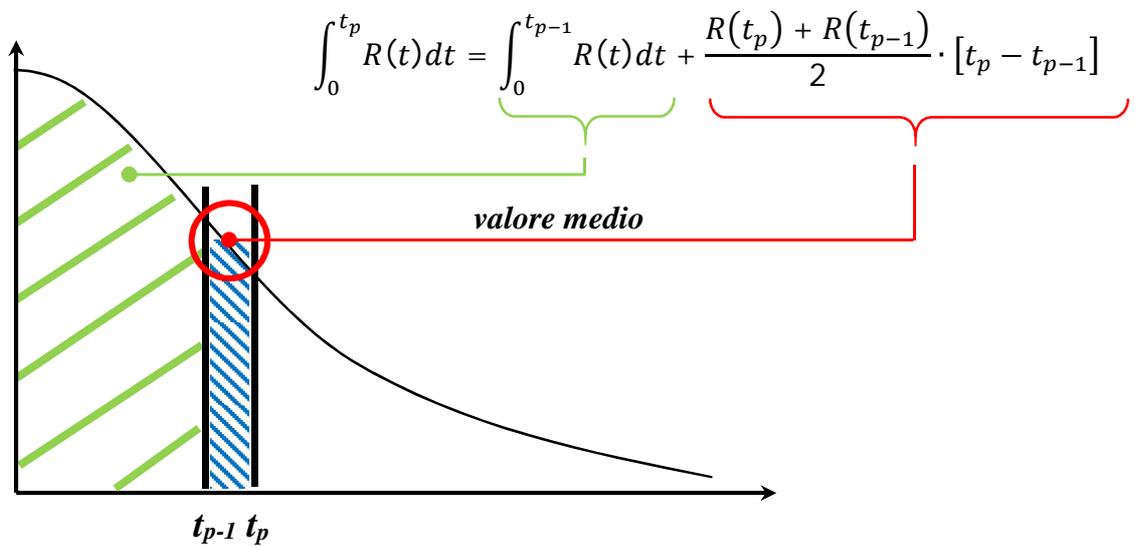
$$UEC(t_p) = \frac{C_p \cdot R(t_p) + C_f \cdot [1 - R(t_p)]}{\int_0^{t_p} R(t_p) dt}$$

Dove:

$$\int_0^{t_p} R(t) dt = \int_0^{t_p - \Delta t} R(t) dt + \frac{R(t_p) + R(t_p - \Delta t)}{2} \cdot \Delta t$$

E Δt è la discretizzazione del calcolo dell'integrale:

$$\Delta t = t_p - t_{p-1}$$



3.6 Teoria per il calcolo dell'MTTF in assenza di dati

Non avendo alcun dato su cui poter fare riferimento per il calcolo dell'*MTTF* ottimo, occorre anzitutto definirne uno, di primo tentativo, possibilmente basato sull'esperienza della squadra manutentiva con componenti simili; tramite la coppia di valori delle variabili β e θ sarà poi possibile raggiungere, attraverso un processo iterativo (discusso nel seguito), la convergenza ad un t_p ottimizzato per la riduzione dei costi complessivi.

Prima di definire le modalità del calcolo iterativo si andranno a valutare i legami che sussistono tra le variabili in gioco ovvero $UEC(t_p)$, β e θ al variare di C_f e C_p .

3.6.1 Andamento degli $UEC(t_p)$

Gli unici valori di cui bisogna esser a conoscenza sono pertanto i costi preventivi C_p e i costi a rottura C_f mediante i quali è possibile andare a valutare l'andamento dei costi unitari attesi al variare di β per θ fissato.

Il metodo che si adotta quindi per generare la variazione dell' $UEC(t_p)$ al variare del rapporto C_f/C_p consiste in un semplice foglio di calcolo excel dove vengono applicate le formule specificate nel paragrafo 3.5:

t_p	$R(t_p)$	$Integrale[R(t_p)]$	C_{prev}	C_{guasto}	$UEC(t_p)$
1	0,999999	0,9999995	99,99995	0,001	100,00095
2	0,999996	1,999997	49,99988	0,001999999	50,001875
3	0,999991	2,9999905	33,33314	0,002999996	33,33613889
4	0,999984	3,999978	24,99974	0,003999999	25,00373749
5	0,999975	4,9999575	19,99967	0,004999998	20,00466998
6	0,999964001	5,999927001	16,66627	0,005999965	16,67226941
7	0,999951001	6,999884502	14,28525	0,006999944	14,29224995
8	0,999936002	7,999828003	12,49947	0,007999916	12,50746867
9	0,999919003	8,999755506	11,11051	0,008999988	11,11951286
10	0,999900005	9,99966501	9,999335	0,009999835	10,00933485
...

Tabella 3.6.1.1 – Variazione dei costi unitari attesi $UEC(t_p)$ al variare di t_p sulla base dei costi C_f e C_p

Come si può vedere vengono riportati, a titolo di esempio, le prime dieci iterazioni per il calcolo del costo unitario atteso, i cui valori vengono ricavati per ciascun incremento di t_p sulla base delle equazioni espresse precedentemente ovvero:

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

$$\int_0^{t_p} R(t) dt = \int_0^{t_p - \Delta t} R(t) dt + \frac{R(t_p) + R(t_p - \Delta t)}{2} \cdot \Delta t$$

$$MTTF = \max \int R(t_p) dt$$

Mentre i costi:

$$C_{prev} = \frac{C_p \cdot R(t_p)}{\int_0^{t_p} R(t_p) dt}$$

$$C_{guasto} = \frac{C_f \cdot [1 - R(t_p)]}{\int_0^{t_p} R(t_p) dt}$$

$$UEC(t_p) = C_{prev} + C_{guasto}$$

Per ciascuna variazione di β, θ, C_f, C_p si otterrà pertanto l' $MTTF$, il t_p e l' $UEC(t_p)$ per quella determinata condizione. Nel foglio di calcolo si va pertanto a valutare per quale t_p corrisponde il minimo costo unitario atteso $UEC(t_p)$.

β	2
θ	1000
MTTF	886,2269255
MTTF/ θ	0,886226925
MTTF/ β	443,1134627

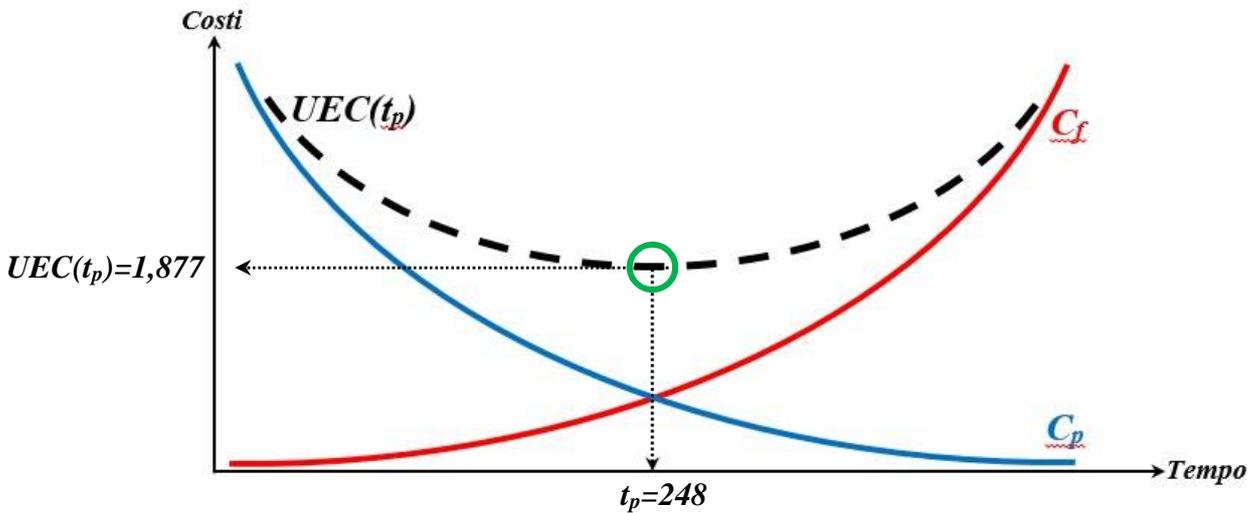
Cop	40 [€/h]
Nop	2 manutentori
MTTR std	1 h
Cricambi	150 [€/intervento]
MTTR guasto	1,5 h
Cfermo prod	2500 [€/h]

Cp	230 €/intervento
Cf	3980 €/intervento
Cf/Cp	17,30434783

$UEC(t_p) \cdot \theta$	$UEC(t_p)$	t_p ottimale
1876,795957	1,876795957	248

Tabella 3.6.1.2 – Esempio di parametri impostati per il calcolo del costo unitario atteso $UEC(t_p)$

Per questo esempio appena riportato abbiamo pertanto la situazione seguente:



Viene pertanto fissato un θ e, andando a variare il rapporto C_f/C_p , si va a creare una serie di scenari al variare di β ottenendo le seguenti tabelle:

UEC(tp) al variare di Beta - $\theta=1000$ e $C_f=1000\text{€}/\text{int.}$											
C_p	1	5	10	25	50	100	125	250	500	750	1000
C_f/C_p	1000	200	100	40	20	10	8	4	2	1,333333333	1
Beta	1	0,999999917	0,999999917	0,999999917	0,999999917	0,999999917	0,999999917	0,999999917	0,999999917	0,999999917	0,999999917
	1,2	0,495908258	0,646806772	0,723672432	0,834924133	0,922042475	1,001612063	1,022667661	1,060565368	1,068062562	1,074717521
	1,4	0,252607141	0,39917071	0,485218562	0,625040422	0,750997465	0,888823139	0,933155615	1,052051168	1,096978265	1,099727189
	1,6	0,145260357	0,265055481	0,342857321	0,479746694	0,614145933	0,775538759	0,831788699	1,003810533	1,109899487	1,115691894
	1,8	0,09222755	0,188222793	0,255544684	0,381343642	0,512872806	0,681253519	0,742982325	0,946441536	1,105483253	1,124494172
	2	0,063223222	0,141126578	0,199166831	0,31292005	0,437811713	0,605612743	0,669415774	0,890815695	1,090797055	1,128243817
	2,2	0,045994473	0,110481923	0,160935413	0,26374048	0,381136673	0,545027512	0,609121456	0,840286086	1,071060839	1,128417555
	2,4	0,035060391	0,089522142	0,1338918	0,227266926	0,337409065	0,49605957	0,559519539	0,795480832	1,049310034	1,12601418
	2,6	0,027738322	0,074579923	0,114064448	0,199454651	0,302957587	0,455992587	0,518354991	0,756071988	1,027203281	1,121765949
	2,8	0,022612652	0,063555117	0,099080347	0,177727819	0,275294181	0,422788855	0,483839902	0,721443577	1,005615013	1,116249214
	3	0,018893779	0,055179776	0,087464412	0,16039606	0,252701837	0,394935604	0,454598976	0,690943152	0,984981551	1,10990484
	3,2	0,016110896	0,048661165	0,078258876	0,146317563	0,233972828	0,371303828	0,429580496	0,663973506	0,965495633	1,103058209
	3,4	0,013974669	0,04347812	0,07082602	0,134699907	0,218239265	0,351047488	0,407975577	0,64001487	0,947216469	1,095943869
	3,6	0,012297945	0,03928322	0,064725452	0,124979448	0,204865676	0,333520398	0,3891618	0,618629056	0,93012989	1,088727527
	3,8	0,01095647	0,035833782	0,059646898	0,116746863	0,193379264	0,318226676	0,37265025	0,599446961	0,914184014	1,081524832
	4	0,009865569	0,032957818	0,055365294	0,109699244	0,183420811	0,304778637	0,358057105	0,582162207	0,899309063	1,074414661
	4,2	0,008965419	0,030530862	0,051716005	0,103607912	0,1747155	0,292871657	0,345076562	0,566517748	0,8854285	1,067450236
	4,4	0,008212934	0,028460927	0,048574987	0,098298112	0,167047885	0,282261584	0,333461212	0,552298598	0,872463838	1,060666028
	4,6	0,007576732	0,026678226	0,045846907	0,093633516	0,160248563	0,272753351	0,323012772	0,539323984	0,860341598	1,054082958
	4,8	0,007033432	0,025129537	0,043459304	0,089507129	0,15418183	0,264187415	0,31356685	0,527441173	0,848991714	1,047713079
	5	0,006565174	0,023773826	0,041354539	0,085834315	0,1487387	0,256433123	0,304988643	0,516520571	0,838348988	1,041561671
	5,2	0,006158231	0,022578815	0,039487092	0,082546081	0,143829578	0,249382244	0,297165881	0,506451795	0,828355053	1,035628798
	5,4	0,005802099	0,021518625	0,037820414	0,079587024	0,139381844	0,242944843	0,290004515	0,497140503	0,818955257	1,029912205
	5,6	0,005488112	0,020572588	0,036324774	0,076911129	0,135334273	0,237046156	0,28342482	0,488505447	0,810100402	1,024406897
5,8	0,005209718	0,019724002	0,03497637	0,074480944	0,131636711	0,23162113	0,277360005	0,480475043	0,801746799	1,019106482	
6	0,004961458	0,018959072	0,033754837	0,072264791	0,128246042	0,226616089	0,271752191	0,472989765	0,79385532	1,014004221	

Tabella 3.6.1.3 – Valori di $UEC(t_p)$ al variare del rapporto C_f/C_p per valori di β crescenti ($\theta = 1000$ e $C_f = 1000\text{€}$)

Come specificato nell'intestazione e nella didascalia della tabella appena riportata, si assume:

$$\theta = 1000 \quad C_f = 1000$$

Tali valori sono stati scelti al fine di semplificare il più possibile i calcoli.

Il valore dell' $UEC(t_p)$ viene pertanto ricavato andando a variare il solo C_p come indicato nella seconda riga.

Come ultima nota si specifica che i calcoli sono validi se viene mantenuta la condizione che:

$$C_p < C_f$$

Allo stesso modo si decide di riefettuare i calcoli applicando $\theta = 500$:

UEC(tp) al variare di Beta											
Cp	1	5	10	25	50	100	125	250	500	750	1000
Cf/Cp	1000	200	100	40	20	10	8	4	2	1,333333333	1
Beta	1	1,999999333	1,999999333	1,999999333	1,999999333	1,999999333	1,999999333	1,999999333	1,999999333	1,999999333	1,999999333
	1,2	0,991822629	1,293634571	1,447347055	1,669853572	1,844085758	2,003224501	2,045335573	2,121130676	2,126175953	2,126175953
	1,4	0,505216241	0,79834306	0,97043984	1,250082121	1,501996012	1,777647115	1,866311971	2,104102874	2,193942847	2,194369936
	1,6	0,290521269	0,530111645	0,685715382	0,959494198	1,228297366	1,551078392	1,663578198	2,007621888	2,219799101	2,230713102
	1,8	0,184455273	0,376445882	0,511089737	0,762687775	1,025746208	1,362508975	1,485968486	1,892883762	2,210966944	2,248982791
	2	0,126446507	0,282276977	0,398337372	0,625840407	0,875623849	1,211226048	1,338832349	1,781632089	2,18159481	2,256487652
	2,2	0,091988973	0,220981973	0,32187094	0,527481162	0,762273651	1,090057649	1,218245069	1,680572845	2,142122266	2,256835179
	2,4	0,07013175	0,179044326	0,26778367	0,454541249	0,674819101	0,99211951	1,119042271	1,590962297	2,098620943	2,252028512
	2,6	0,055479041	0,149169787	0,22813055	0,398909401	0,605916405	0,91198548	1,036712921	1,512147036	2,054408301	2,243532154
	2,8	0,045230461	0,12711025	0,198166236	0,355459359	0,550588501	0,845582504	0,967680114	1,4428877	2,011230799	2,232498793
	3	0,037788766	0,110359564	0,174928847	0,320792175	0,505403785	0,789871424	0,909198221	1,38188681	1,969963897	2,219810154
	3,2	0,032221793	0,097322342	0,156517769	0,292638995	0,467945747	0,742607844	0,859161512	1,327947481	1,930993705	2,206117273
	3,4	0,027950115	0,086959835	0,141652052	0,269402161	0,436479796	0,702095138	0,815956229	1,280030174	1,894433749	2,191888404
	3,6	0,024596377	0,078566444	0,129450913	0,249960886	0,409733036	0,667044959	0,778324715	1,237259627	1,860260591	2,177455808
	3,8	0,02191294	0,071668108	0,119293804	0,233496775	0,386758583	0,63645348	0,745300666	1,198898623	1,828368834	2,163050703
	4	0,019730837	0,065915638	0,110732915	0,219398509	0,36684167	0,609561094	0,71611436	1,164329056	1,798618924	2,148830223
	4,2	0,017930837	0,06106375	0,103432015	0,207218749	0,349431042	0,585743418	0,690153445	1,133040676	1,770858016	2,134902395
	4,4	0,016425868	0,056922297	0,097149978	0,196597088	0,334095807	0,564523261	0,666927128	1,104601427	1,744928454	2,121333574
	4,6	0,015153752	0,053356453	0,091694986	0,187267721	0,320499256	0,545506788	0,646025661	1,078651296	1,720688017	2,108166983
	4,8	0,014066864	0,050259502	0,08691947	0,179016904	0,30836369	0,528376318	0,627136745	1,05488526	1,697986297	2,095429012
	5	0,013130349	0,047548812	0,082709081	0,171668641	0,297478499	0,512867034	0,609977387	1,033044468	1,676703174	2,083124866
	5,2	0,012317037	0,045157631	0,078974186	0,165093859	0,287661361	0,498764949	0,594331856	1,012908406	1,656710841	2,071259757
	5,4	0,011604198	0,043037971	0,075641018	0,159174056	0,278764758	0,48588975	0,580009117	0,994284574	1,6379114	2,059825625
	5,6	0,010976225	0,041145176	0,07265045	0,153822265	0,270668567	0,474092431	0,566849722	0,977011131	1,620201517	2,048815037
5,8	0,010419435	0,039448004	0,069952743	0,148961896	0,263274417	0,4632429	0,554720088	0,960950315	1,603499523	2,038216361	
6	0,009922916	0,037918144	0,067509675	0,144530455	0,256492102	0,453232231	0,543507935	0,945982212	1,587711563	2,028010942	

Tabella 3.6.1.4 - Valori di UEC(t_p) al variare del rapporto C_f/C_p per valori di β crescenti ($\theta = 500$ e $C_f = 1000$)

Si generano quindi i diagrammi riferiti ad entrambe le tabelle di modo da verificare l'andamento degli UEC(t_p):

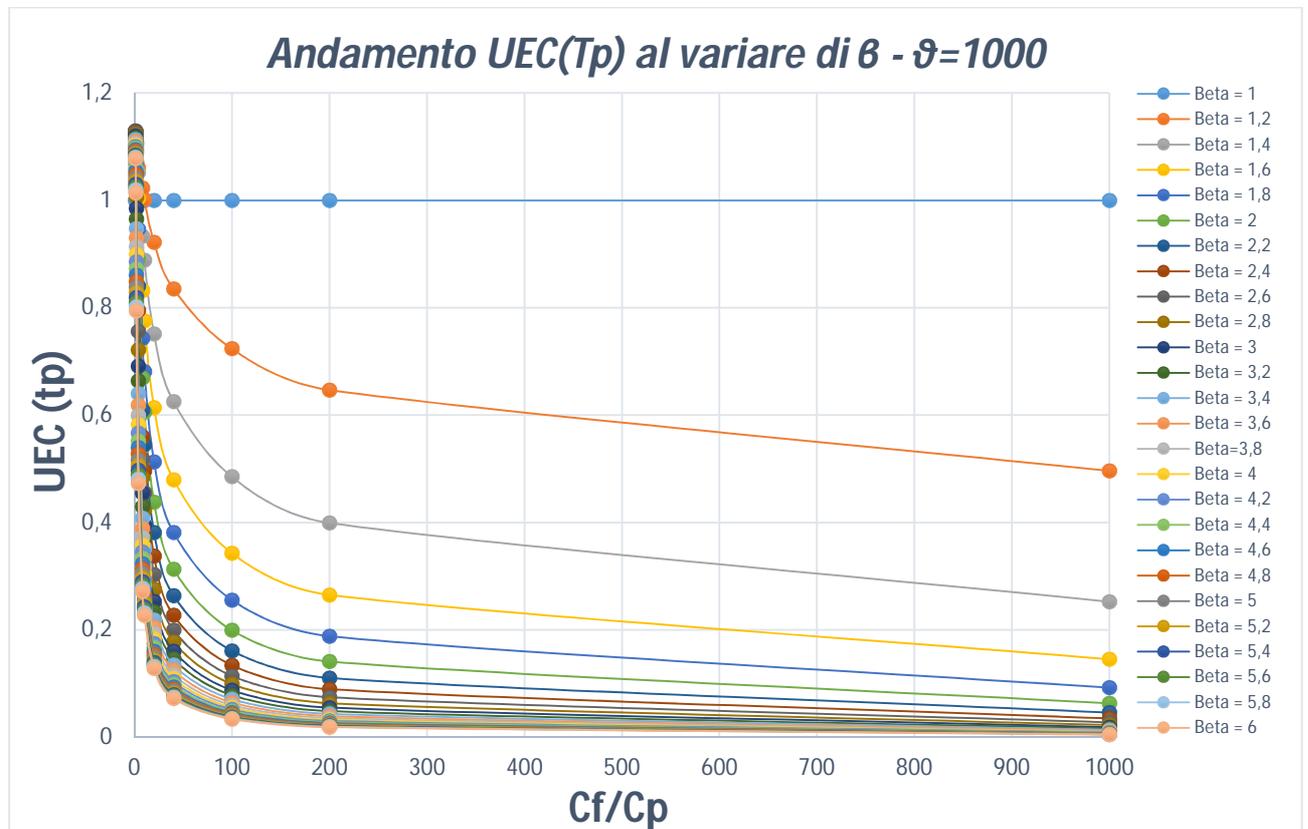


Figura 3.6.1.5 - Andamento UEC(t_p) al variare di β per $\theta = 1000$

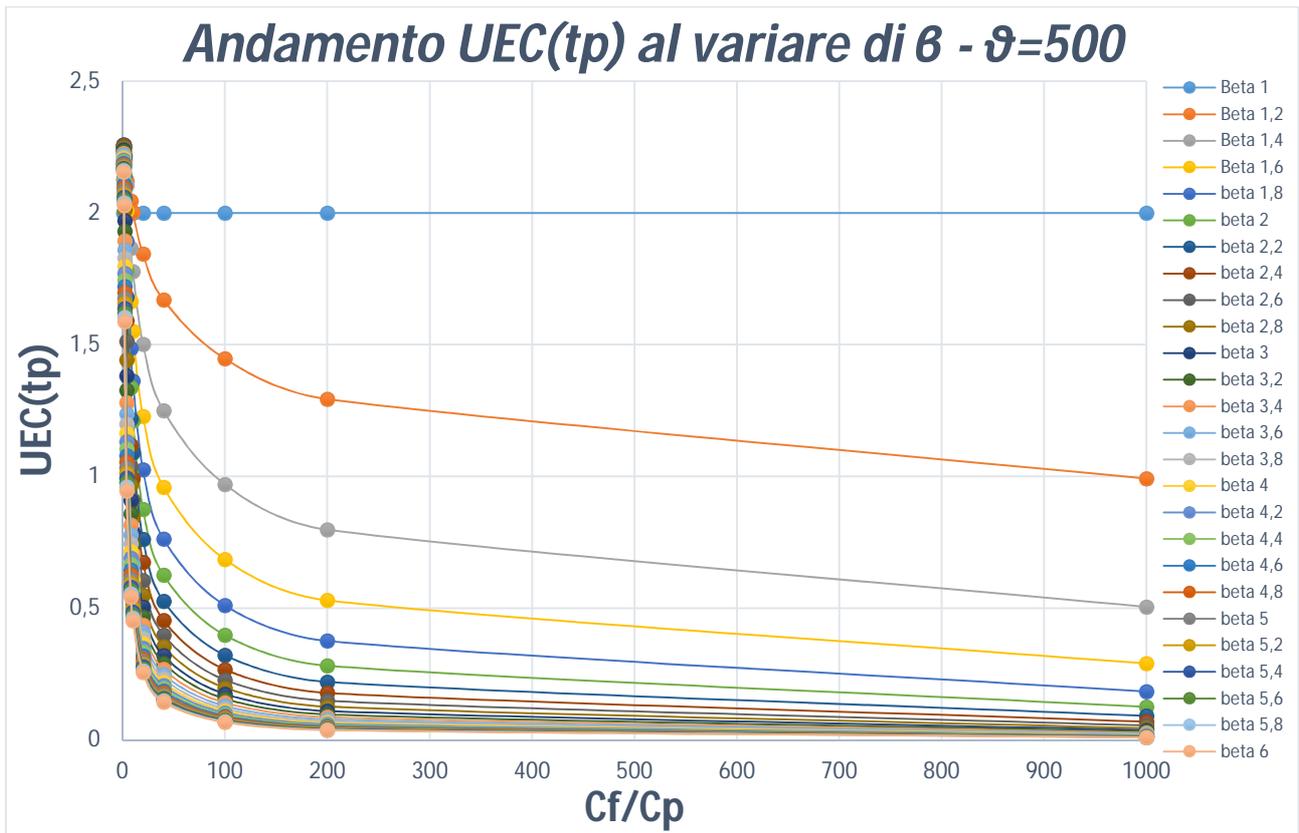


Figura 3.6.1.6 - Andamento $UEC(t_p)$ al variare di β per $\theta = 500$

Come si può notare per qualsiasi condizione di θ , all'aumentare di β , si ha una sempre più marcata riduzione degli $UEC(t_p)$ per bassi rapporti di C_f/C_p .

Per comprendere come interviene il θ nel calcolo del costo unitario atteso si mettono assieme i due diagrammi:

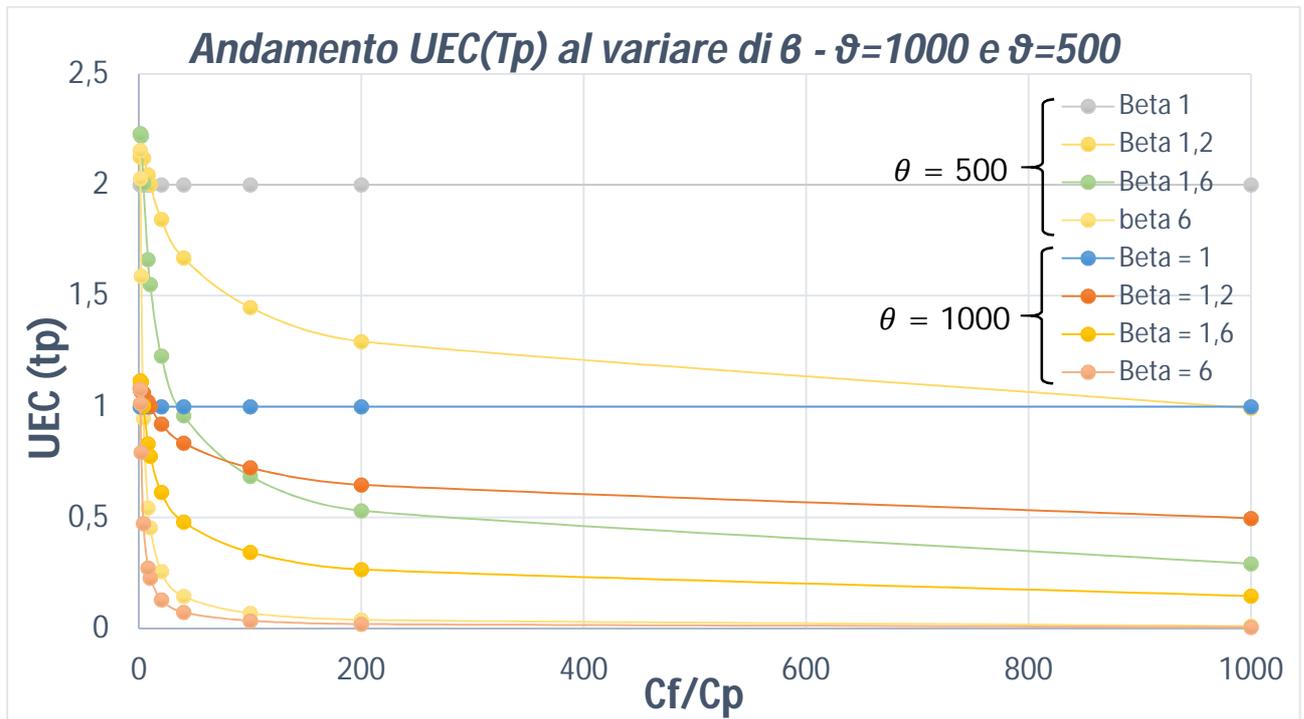


Figura 3.6.1.7 - Andamento $UEC(t_p)$ al variare di β per $\theta = 500$ e $\theta = 1000$

Effettuando alcune variazioni sui dati visualizzabili nel diagramma si riscontra che per $1 < \beta < 3$ l'andamento del costo unitario atteso presenta una differenza via via decrescente all'aumentare di β osservando che l' $UEC(t_p)_{\theta=500}$ di $\beta = 6$ è praticamente coincidente a $UEC(t_p)_{\theta=1000}$ di $\beta = 3$:

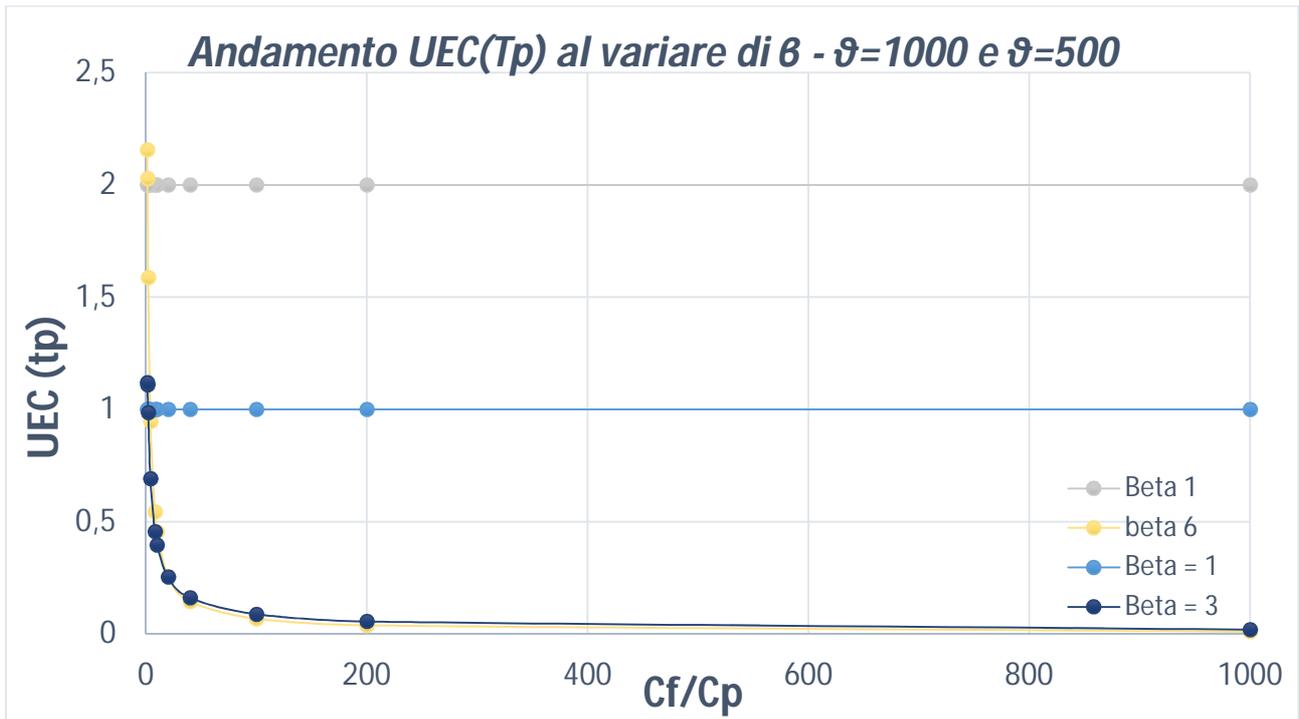


Figura 3.6.1.8 - Andamento $UEC(t_p)$ al variare di β per $\theta = 500$ e $\theta = 1000$

Si verifica quindi che all'aumentare di β si otterrà, per qualsiasi θ , una convergenza ad un valore minimo che sarà esclusivamente dipendente dai costi di manutenzione preventiva e a guasto.

Tale affermazione viene confermata andando a generare nuovamente le tabelle 3.6.1.3 e 3.6.1.5 moltiplicando tutti i valori ottenuti di $UEC(t_p)$ per θ :

UEC(tp)xθ al variare di Beta - θ=1000 e Cf=1000€/int.											
	Cp	1	5	10	25	50	100	125	250	500	1000
	Cf/Cp	1000	200	100	40	20	10	8	4	2	1,333333333
Beta	1	999,9999167	999,9999167	999,9999167	999,9999167	999,9999168	999,9999169	999,9999172	999,9999172	999,9999167	999,9999167
	1,2	495,9082583	646,806772	723,6724322	834,924133	922,0424751	1001,612063	1022,667661	1060,565368	1068,062562	1074,717521
	1,4	252,6071414	399,1707096	485,218562	625,0404223	750,9974649	888,823139	933,1556152	1052,051168	1096,978265	1099,727189
	1,6	145,2603567	265,0554807	342,8573212	479,7466941	614,1459328	775,5387594	831,7886994	1003,810533	1109,899487	1115,691894
	1,8	92,22754983	188,2227934	255,5446836	381,3436418	512,8728059	681,2535195	742,9823253	946,441536	1105,483253	1124,494172
	2	63,22322206	141,1265782	199,1668307	312,9200496	437,8117133	605,6127432	669,4157742	890,8156946	1090,797055	1128,243817
	2,2	45,99447324	110,4819229	160,9354128	263,7404802	381,1366725	545,027512	609,1214562	840,2860855	1071,060839	1128,417555
	2,4	35,06039146	89,52214214	133,8917997	227,2669262	337,4090653	496,0595705	559,5195391	795,4808319	1049,310034	1126,01418
	2,6	27,73832217	74,57992261	114,0644475	199,4546513	302,9575866	455,9925872	518,3549913	756,0719882	1027,203281	1121,765949
	2,8	22,61265223	63,55511689	99,08034725	177,7278186	275,2941815	422,7888551	483,839902	721,4435774	1005,615013	1116,249214
	3	18,893779	55,17977618	87,46441217	160,3960599	252,7018371	394,9356037	454,5989761	690,9431524	984,9815511	1109,90484
	3,2	16,11089586	48,66116464	78,2588763	146,3175627	233,9728282	371,3038284	429,5804965	663,9735063	965,4956327	1103,058209
	3,4	13,97466931	43,4781202	70,82601954	134,6999073	218,2392647	351,0474875	407,9755773	640,0148695	947,2164687	1095,943869
	3,6	12,29794525	39,28321984	64,7254516	124,9794485	204,865676	333,5203978	389,1618001	618,6290557	930,1298904	1088,727527
	3,8	10,95646973	35,83378227	59,64689794	116,7468632	193,3792639	318,2266763	372,6502498	599,4469606	914,1840141	1081,524832
	4	9,86569249	32,95781774	55,36529442	109,6992444	183,4208108	304,7786372	358,0571047	582,1622072	899,3090629	1074,414661
	4,2	8,965418608	30,53086178	51,71600499	103,6079124	174,7154997	292,8716574	345,0765619	566,5177479	885,4285005	1067,450236
	4,4	8,212933754	28,46092723	48,57498659	98,29811214	167,047885	282,2615835	333,4612116	552,2985981	872,4638375	1060,666028
	4,6	7,576731665	26,67822574	45,84690711	93,63351562	160,2485626	272,7533511	323,0127724	539,3239842	860,341598	1054,082958
	4,8	7,033431858	25,1295375	43,45930388	89,50712889	154,1818298	264,1874147	313,5668501	527,4411732	848,9917135	1047,713079
	5	6,56517445	23,7738261	41,35453884	85,83431533	148,7387	256,433123	304,9886431	516,5205709	838,348988	1041,561671
	5,2	6,158231417	22,57881499	39,48709177	82,54608098	143,8295782	249,3824403	297,165881	506,4517951	828,3550534	1035,628798
	5,4	5,802098793	21,51862541	37,82041389	79,58702359	139,3818442	242,9448433	290,0045147	497,1405034	818,9552567	1029,912205
	5,6	5,488112304	20,57258781	36,32477392	76,91112855	135,3342728	237,0461564	283,4248197	488,5054465	810,1004025	1024,406897
5,8	5,209717604	19,72400193	34,9763705	74,48094428	131,636711	231,6211298	277,3600048	480,4750427	801,7467987	1019,106482	
6	4,961458093	18,95907187	33,75483687	72,26479113	128,2460418	226,6160891	271,7521908	472,9897653	793,8553195	1014,004221	

Tabella 3.6.1.9 - Valori di $UEC(t_p) \cdot \theta$ al variare del rapporto C_f/C_p per valori di β crescenti ($\theta = 1000$ e $C_f = 1000\text{€}$)

UEC(tp)·θ al variare di Beta - θ=500 e Cf=1000€/int.												
Cp	1	5	10	25	50	100	125	250	500	750	1000	
Cf/Cp	1000	200	100	40	20	10	8	4	2	1,333333333	1	
Beta	1	999,9996667	999,9996667	999,9996667	999,9996667	999,9996667	999,9996667	999,9996667	999,9996667	999,9996667	999,9996667	999,9996667
	1,2	495,9113147	646,8172856	723,6735273	834,926786	922,0428791	1001,61225	1022,667787	1060,565338	1063,087976	1063,087976	1063,087976
	1,4	252,6081203	399,17153	485,2199199	625,0410603	750,998006	888,8235575	933,1559856	1052,051437	1096,971423	1097,184968	1097,184968
	1,6	145,2606343	265,0558224	342,8576912	479,7470992	614,1486828	775,5391959	831,7890988	1003,810944	1109,899551	1115,356551	1115,356552
	1,8	92,22763659	188,2229409	255,5448686	381,3438877	512,8731042	681,2544876	742,9842431	946,441881	1105,483472	1124,491396	1124,496704
	2	63,22325365	141,1384887	199,168686	312,9202034	437,8119246	605,6130239	669,4161744	890,8160447	1090,797405	1128,243826	1128,379167
	2,2	45,99448653	110,4909863	160,9354699	263,740581	381,1368257	545,0288244	609,1225344	840,2864226	1071,061133	1128,41759	1129,146389
	2,4	35,06875012	89,52216313	133,8918348	227,2706244	337,4095505	496,0597552	559,5211356	795,4811487	1049,310472	1126,014256	1128,054352
	2,6	27,73952028	74,58489332	114,0652748	199,4547007	302,9582026	455,9927398	518,3564607	756,0735181	1027,204151	1121,766077	1125,859324
	2,8	22,61523059	63,55512514	99,0831181	177,7296794	275,2942504	422,7912522	483,8400572	721,44385	1005,615399	1116,249396	1123,02648
	3	18,89438316	55,1797818	87,46442341	160,3960877	252,7018925	394,9357122	454,5991105	690,9434048	984,9819485	1109,905077	1119,846522
	3,2	16,11089657	48,66117111	78,25888459	146,3194974	233,9728736	371,3039219	429,5807561	663,9737405	965,4968524	1103,058637	1116,502989
	3,4	13,97505738	43,47991764	70,82602584	134,7010804	218,2398979	351,047569	407,9781146	640,0150871	947,2168744	1095,944202	1113,12232
	3,6	12,29818848	39,28322203	64,72545653	124,9804431	204,8665178	333,5224793	389,1623577	618,6298136	930,1302956	1088,727904	1109,747745
	3,8	10,95646997	35,83405406	59,64690189	116,7483876	193,3792915	318,2267399	372,6503332	599,4493113	914,1844168	1081,525351	1106,45532
	4	9,866127152	32,95781909	55,36645765	109,6992545	183,4208348	304,7805472	358,0571801	582,164528	899,3094619	1074,415112	1103,262651
	4,2	8,965418745	30,5318752	51,71600765	103,6093744	174,7155208	292,871709	345,0767225	566,520338	885,4290078	1067,451197	1100,185537
	4,4	8,212933862	28,46114833	48,57498881	98,29854389	167,0479037	282,2616304	333,4635638	552,3007136	872,464227	1060,666787	1097,23193
	4,6	7,576876138	26,67822649	45,84749297	93,63386029	160,2496278	272,753394	323,0128305	539,3256481	860,3440085	1054,083492	1094,404621
	4,8	7,033431927	25,12975103	43,45973483	89,50845209	154,1818449	264,1881588	313,5683724	527,4426302	848,9931485	1047,714506	1091,703032
5	6,565174506	23,77440618	41,35454026	85,83432047	148,7392497	256,4335168	304,9886934	516,5222338	838,3515872	1041,562433	1089,124421	
5,2	6,158518738	22,57881546	39,48709303	82,54692964	143,8306807	249,3824744	297,1659279	506,4542031	828,3554207	1035,629879	1086,6647	
5,4	5,802098833	21,51898539	37,82050886	79,58702779	139,382379	242,944875	290,0045586	497,1422868	818,9557001	1029,912812	1084,318988	
5,6	5,488112338	20,57258817	36,32522523	76,91113236	135,3342834	237,0462157	283,4248612	488,5055656	810,1007586	1024,407518	1082,081981	
5,8	5,209717633	19,72400224	34,97637139	74,48094778	131,6372087	231,6214502	277,3600441	480,4751574	801,7497617	1019,108181	1079,948212	
6	4,961458119	18,95907215	33,75483768	72,26522752	128,246051	226,6161154	271,7539677	472,9911062	793,8557817	1014,005471	1077,912213	

Tabella 3.6.1.10 - Valori di $UEC(t_p) \cdot \theta$ al variare del rapporto C_f/C_p per valori di β crescenti ($\theta = 500$ e $C_f = 1000\text{€}$)

Effettuando un rapido confronto con i termini ottenuti nei due casi considerati ($\theta = 1000$ e $\theta = 500$) si nota immediatamente che si presentano i medesimi valori ottenendo pertanto il diagramma di $UEC(t_p)$ indipendente da θ :

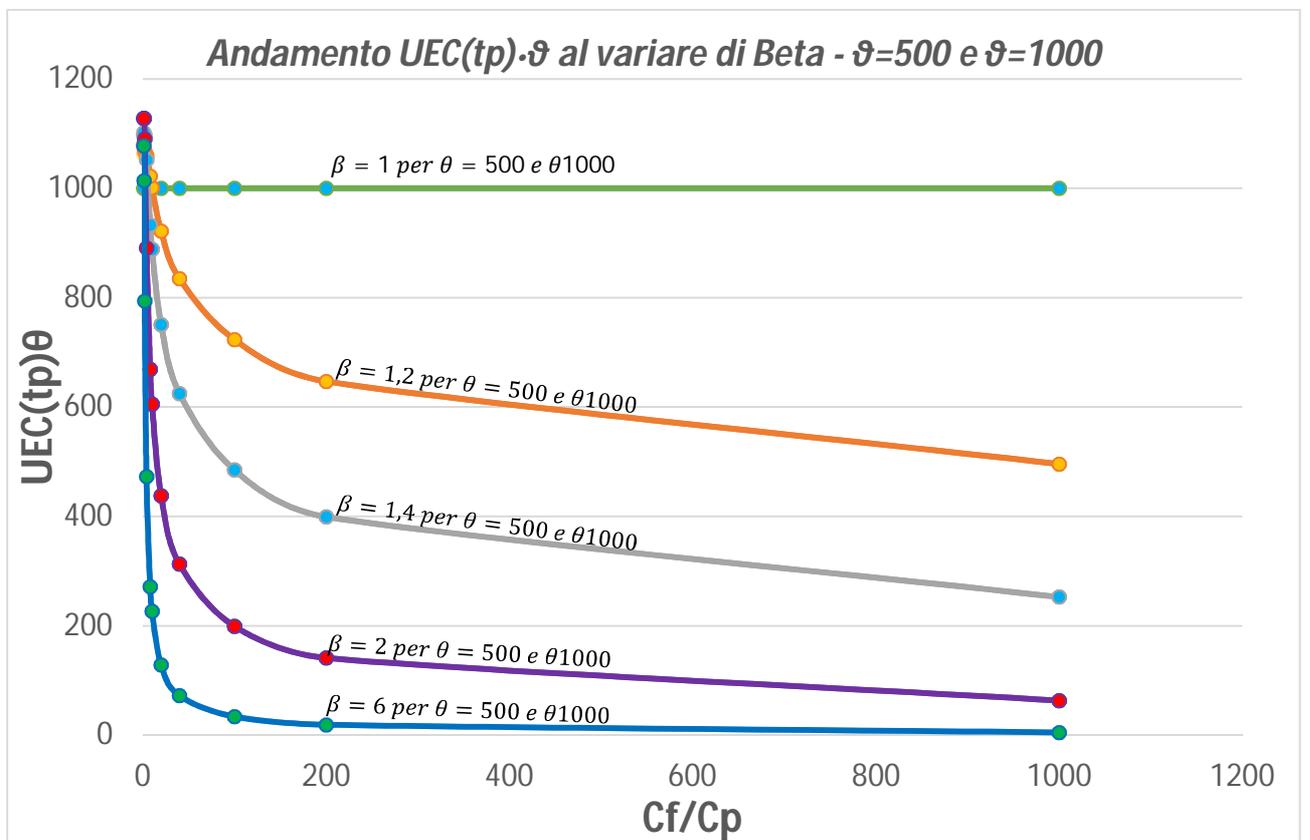


Figura 3.6.1.11 - Andamento $UEC(t_p) \cdot \theta$ al variare di β per $\theta = 500$ e $\theta = 1000$

3.6.2 Metodo iterativo di calcolo dell'MTTF in assenza di dati

Come detto a inizio capitolo quello che si vuol ottenere è il cadenzamento con cui sia possibile andare a sostituire un componente di cui non si conoscono le caratteristiche di resistenza, ma che possa esser ricondotto ad un componente della stessa tipologia o funzione. I parametri che consentono questo procedimento sono appunto β e θ ma per poterli stimare correttamente occorrerà applicare il metodo di verifica descritto qui nel seguito:

I. Raccolta dei dati disponibili e definizione dell'MTTF di primo tentativo:

Anzitutto è bene avere un'idea delle principali fonti di costo ovvero dei costi della manutenzione preventiva C_p e dei costi che si avrebbero invece in caso di guasto C_f del nuovo componente.

Allo stesso tempo occorrerà andare a definire un *MTTF* di primo tentativo sulla base dell'esperienza della squadra manutentiva o attingere da un componente avente stessa funzione, ma di cui si conosce già l'*MTTF* e il relativo costo unitario $UEC(t_p)$.

II. Applicazione dei dati per la valutazione dei β e dei θ :

Tramite l'equazione di Weibull è possibile calcolare i valori di *MTTF* corrispondenti a specifiche coppie di valori di β e di θ . Raccogliendo i valori in un'apposita tabella sarà possibile individuare per quali valori di β e di θ verrà rispettato l'*MTTF* scelto di primo tentativo.

Grazie alla tabella appena creata sarà possibile andare a mappare graficamente le variazioni di *MTTF* per i vari β e θ .

III. Calcolo dei costi unitari attesi $UEC(t_p)$:

Con i range di valori di β e θ che consentono di rispettare l'*MTTF* prescelto si andranno a calcolare i costi unitari attesi $UEC(t_p)$ e i rispettivi t_p che occorrerebbe adottare per ottenere quel costo alla specifica coppia di valori di β e θ .

IV. Valutazione dei costi per β differenti:

Si conclude l'analisi di costo per *MTTF* prescelto andando a valutare gli $UEC(t_p)$ per β differenti (e appartenenti comunque al range di β definito nel secondo punto) definiti come β^* .

Si vanno pertanto a prelevare i valori di costo che si otterrebbero ai t_p riferiti al β^* .

Con gli $UEC(t_p^*)$ ottenuti dai β^* sarà possibile creare delle tabelle riportanti le differenze di costo per i vari β disponibili al fine di valutare cosa comporterebbe se l'usura del componente non fosse corretta.

Per una miglior comprensione di quanto appena scritto si consiglia di attendere quanto definito nei paragrafi qui a seguito (3.6.3 e 3.6.4).

3.6.3 Calcolo dei β e θ sulla base dell'MTTF di primo tentativo

Nel capitolo 3.6.1 avevamo ottenuto come variano i costi unitari attesi in base ai β , θ e ai costi C_p e C_f . I costi così ottenuti erano riferiti pertanto ad un *MTTF* che dipendeva prettamente dalla coppia di valori β e θ che si erano utilizzati per tracciare gli andamenti degli $UEC(t_p)$.

Dato però che le coppie di valori di β e θ non sono note al lato pratico, occorre a questo punto definire un metodo che operi in senso inverso, ovvero, definire un *MTTF* di primo tentativo (che possa esser eventualmente ipotizzato sulla base dell'esperienza pregressa con componenti simili o più semplicemente su tempistiche di convenienza) tramite il quale sia possibile ottenere le combinazioni di β e θ tali da garantire tale *MTTF*.

Dato che per Weibull si aveva che:

$$MTTF = \int_1^t R(t) dt$$

Dove:

$$\int_1^t R(t) dt = \int_0^{t-1} R(t)dt + \frac{e^{-\left(\frac{t}{\theta}\right)^\beta} + e^{-\left(\frac{t-1}{\theta}\right)^\beta}}{2} \cdot [t - (t - 1)]$$

È possibile pertanto ottenere *MTTF* al variare di β per θ riportando tali dati per valori di θ fissati :

beta	0.25	0.5	0.75	1	1.25	1.5	1.75	2	2.25	2.5	2.75	3	3.25	3.5	3.75	4	4.25	4.5	4.75	5
theta	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
MTTF	10123.61	1999.59	1190.64	1000.00	931.38	902.75	890.62	886.23	885.73	887.26	889.86	892.98	896.33	899.75	903.12	906.40	909.56	912.57	915.44	918.17
MTTF/theta	10.12	2.00	1.19	1.00	0.93	0.90	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.90	0.90	0.90	0.91	0.91	0.91	0.92	0.92

t	Int R(t)	Int R(t)	Int R(t)	Int R(t)	Int R(t)	Int R(t)	Int R(t)	Int R(t)	Int R(t)	Int R(t)	Int R(t)	Int R(t)	Int R(t)	Int R(t)	Int R(t)	Int R(t)					
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0.918543	0.984436	0.997196	0.9995	0.999911	0.999984189	0.999997188	0.9999995	0.999999911	0.999999984	0.999999997	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1.741781	1.947004	1.989686	1.998001	1.999611	1.999923658	1.999984919	1.999997	1.999999399	1.999999879	1.999999975	1.999999995	1.999999999	2	2	2	2	2	2	2	2
3	2.542144	2.898486	2.978611	2.995505	2.999048	2.999796787	2.999956234	2.9999905	2.999994723	2.999999543	2.999999899	2.999999978	2.999999995	2.999999999	3	3	3	3	3	3	3
4	3.326633	3.841193	3.964353	3.992011	3.998195	3.999588161	3.999905197	3.999978	3.999994858	3.999998791	3.999999714	3.999999932	3.999999984	3.999999996	4	4	4	4	4	4	4
5	4.098707	4.776415	4.947149	4.987521	4.997028	4.99928494	4.999826382	4.9999575	4.999989522	4.999997401	4.999999352	4.999999838	4.999999959	4.999999999	5	5	5	5	5	5	5
6	4.860488	5.705013	5.927172	5.982036	5.995529	5.9987587	5.999714706	5.999927001	5.999981189	5.999995123	5.999998729	5.999999667	5.999999912	5.999999977	6	6	6	6	6	6	6
7	5.613429	6.627615	6.904553	6.975558	6.993683	6.998350799	6.999565341	6.999884502	6.99996092	6.99997678	6.999987748	6.999993388	6.99999833	6.99999954	7	7	7	7	7	7	7
8	6.358595	7.544704	7.879401	7.968086	7.991477	7.997700411	7.99937366	7.999828003	7.999952436	7.999986767	7.999996299	7.99999896	7.999999707	7.999999917	8	8	8	8	8	8	8
9	7.096804	8.456671	8.851805	8.959622	8.988898	8.996916043	8.999135199	8.999755506	8.999930391	8.999980662	8.999994259	8.99999834	8.999999518	8.999999859	9	9	9	9	9	9	9
10	7.828706	9.363836	9.821842	9.950167	9.985936	9.99589568	9.998845637	9.99966501	9.999902106	9.99997122	9.999991495	9.999997475	9.999999247	9.999999775	10	10	10	10	10	10	10
11	8.554831	10.26647	10.78958	10.93972	10.98258	10.99491331	10.99850077	10.99955452	10.9998667	10.99995807	10.99998786	10.99999631	10.99999887	10.99999966	11	11	11	11	11	11	11
12	9.27562	11.16481	11.75508	11.92829	11.97882	11.99367996	11.9980965	11.99942203	11.99982328	11.99994564	11.999978319	11.99999478	11.99999837	11.99999949	12	12	12	12	12	12	12
13	9.991449	12.05905	12.71839	12.91587	12.97465	12.99228256	12.99762882	12.99926654	12.99977092	12.99992812	12.99997733	12.99999282	12.99999772	12.99999927	13	13	13	13	13	13	13
14	10.70264	12.94938	13.67957	13.90246	13.97005	13.99071443	13.99709382	13.99908305	13.99970868	13.99990689	13.99997009	13.99999035	13.99999687	13.99999898	14	14	14	14	14	14	14
15	11.40947	13.83595	14.63865	14.88806	14.96504	14.98896915	14.99648764	14.99887258	14.9996356	14.99988152	14.99996128	14.99998729	14.99999581	14.99999861	15	15	15	15	15	15	15
16	12.11218	14.7189	15.59657	15.87268	15.95958	15.98704052	15.99580651	15.99863211	15.9995071	15.9998155	15.99990507	15.99993355	15.9999449	15.9999815	16	16	16	16	16	16	16
17	12.811	15.59837	16.55068	16.85632	16.95368	16.98492258	16.99504672	16.99835964	16.99945301	16.99981652	16.99993814	16.99997905	16.99999288	16.99999757	17	17	17	17	17	17	17
18	13.50611	16.47447	17.50371	17.83977	17.94734	17.98260953	17.99420462	17.99805319	17.9993415	17.99977594	17.99992337	17.99997368	17.99999092	17.99999686	18	18	18	18	18	18	18
19	14.19769	17.34732	18.45479	18.82064	18.94054	18.98009573	18.9932766	18.99771075	18.99921516	18.99972933	18.99990617	18.99996733	18.99998558	18.99999599	19	19	19	19	19	19	19
20	14.8859	18.217	19.40395	19.80133	19.93328	19.9737575	19.99225912	19.99733032	19.99907294	19.99976717	19.9998863	19.9999599	19.9999858	19.99999496	20	20	20	20	20	20	20

Tabella 3.6.3.1 - Valori di *MTTF* calcolati con l'equazione di Weibull per θ fissato, al variare di β

Anche qui vengono indicati a titolo figurativo i primi 20 passaggi dove l'*MTTF* corrispondente per ciascun β sarà il valore riportato nella corrispettiva colonna "*Int R(t)*" che, per $t \rightarrow \infty$, convergerà ad un valore invariante all'aumentare di t .

Si effettuano pertanto variazioni di θ nella seconda riga e si raccolgono i dati nella tabella seguente:

		BETA																			
		0,25	0,5	0,75	1	1,25	1,5	1,75	2	2,25	2,5	2,75	3	3,25	3,5	3,75	4	4,25	4,5	4,75	5
THETA	250	4123,679	500,0114	297,662	250,0003	232,846	225,6863	222,6544	221,5567	221,4326	221,816	222,4642	223,2449	224,0834	224,9368	225,7805	226,6006	227,3894	228,1433	228,8609	229,5422
	500	6647,144	999,8002	595,3209	500,0002	465,6919	451,3726	445,3089	443,1135	442,8652	443,6319	444,9284	446,4898	448,1667	449,8736	451,5611	453,2012	454,7789	456,2866	457,7217	459,0844
	750	8559,438	1499,942	892,9804	750,0001	698,5378	677,059	667,9633	664,6702	664,2978	665,4479	667,3926	669,7346	672,2501	674,8104	677,3416	679,8019	682,1683	684,4299	686,5826	688,6266
	1000	10123,61	1999,589	1190,64	1000	931,3838	902,7453	890,6177	886,2269	885,7305	887,2638	889,8568	892,9795	896,3334	899,7472	903,1222	906,4025	909,5578	912,5732	915,4435	918,1687
	1250	11457,19	2498,506	1488,3	1250	1164,23	1128,432	1113,272	1107,784	1107,163	1109,08	1112,321	1116,224	1120,417	1124,684	1128,903	1133,003	1136,947	1140,717	1144,304	1147,711
	1500	12624,67	2996,113	1785,96	1500	1397,076	1354,118	1335,927	1329,34	1328,596	1330,896	1334,785	1339,469	1344,5	1349,621	1354,683	1359,604	1364,337	1368,86	1373,165	1377,253
	1750	13665,87	3491,776	2083,619	1750	1629,922	1579,804	1558,581	1550,897	1550,028	1552,712	1557,249	1562,714	1568,583	1574,558	1580,464	1586,204	1591,726	1597,003	1602,026	1606,795
	2000	14607,3	3984,875	2381,279	2000	1862,768	1805,491	1781,235	1772,454	1771,461	1774,528	1779,714	1785,959	1792,667	1799,494	1806,244	1812,805	1819,116	1825,146	1830,887	1836,337
	2250	15467,65	4474,839	2678,939	2250	2095,613	2031,177	2003,89	1994,011	1992,894	1996,344	2002,178	2009,204	2016,75	2024,431	2032,025	2039,406	2046,505	2053,29	2059,748	2065,88
	2500	16260,62	4961,165	2976,599	2500	2328,459	2256,863	2226,544	2215,567	2214,326	2218,16	2224,642	2232,449	2240,834	2249,368	2257,805	2266,006	2273,894	2281,433	2288,609	2295,422
	2750	16996,62	5443,225	3274,258	2750	2561,305	2482,55	2449,199	2437,124	2435,759	2439,975	2447,106	2455,694	2464,917	2474,305	2483,586	2492,607	2501,284	2509,576	2517,469	2524,964
	3000	17683,71	5921,261	3571,917	3000	2794,151	2708,236	2671,853	2658,681	2657,191	2661,791	2669,57	2678,939	2689	2699,242	2709,366	2719,207	2728,673	2737,72	2746,33	2754,506
	3250	18328,33	6394,379	3869,575	3250	3026,997	2933,922	2894,508	2880,238	2878,624	2883,607	2892,034	2902,183	2913,084	2924,178	2935,147	2945,808	2956,063	2965,863	2975,191	2984,048
	3500	18935,68	6862,548	4167,23	3500	3259,843	3159,609	3117,162	3101,794	3100,057	3105,423	3114,499	3125,428	3137,167	3149,115	3160,928	3172,409	3183,452	3194,006	3204,052	3213,591
	3750	19510,03	7325,586	4464,88	3750	3492,689	3385,295	3339,816	3323,351	3321,489	3327,239	3336,963	3348,673	3361,25	3374,052	3386,708	3399,009	3410,842	3422,15	3432,913	3443,133
	4000	20054,94	7783,358	4762,523	4000	3725,535	3610,981	3562,471	3544,908	3542,922	3549,055	3559,427	3571,918	3585,334	3598,989	3612,489	3625,61	3638,231	3650,293	3661,774	3672,675
	4250	20573,4	8235,765	5060,153	4250	3958,381	3836,667	3785,125	3766,464	3764,354	3770,871	3781,891	3795,163	3809,417	3823,926	3838,269	3852,211	3865,621	3878,436	3890,635	3902,217
4500	21067,96	8682,742	5357,765	4500	4191,227	4062,354	4007,78	3988,021	3985,787	3992,687	4004,355	4018,408	4033,5	4048,862	4064,05	4078,811	4093,01	4106,58	4119,496	4131,759	
4750	21540,81	9124,253	5655,351	4750	4424,073	4288,04	4230,434	4209,578	4207,22	4214,503	4226,82	4241,653	4257,584	4273,799	4289,83	4305,412	4320,399	4334,723	4348,356	4361,302	
5000	21993,85	9560,282	5952,9	5000	4656,919	4513,726	4453,089	4431,135	4428,652	4436,319	4449,284	4464,898	4481,667	4498,736	4515,611	4532,012	4547,789	4562,866	4577,217	4590,844	

Tabella 3.6.3.2 – Valori di MTTF raccolti dalla tabella di Weibull al variare di θ

Come evidenziato, si riscontra che i valori di MTTF per $\beta < 1$ non sono significativi poiché per t comunque elevati (limitazione di excel) non si riesce a convergere ad un valore ben definito oltre che aver imposto fin dall'inizio che β deve esser maggiore di 1 per operare nella condizione di usura.

Si ritagliano pertanto i dati come segue:

		BETA																
		1	1,25	1,5	1,75	2	2,25	2,5	2,75	3	3,25	3,5	3,75	4	4,25	4,5	4,75	5
THETA	250	250,0003	232,846	225,6863	222,6544	221,5567	221,4326	221,816	222,4642	223,2449	224,0834	224,9368	225,7805	226,6006	227,3894	228,1433	228,8609	229,5422
	500	500,0002	465,6919	451,3726	445,3089	443,1135	442,8652	443,6319	444,9284	446,4898	448,1667	449,8736	451,5611	453,2012	454,7789	456,2866	457,7217	459,0844
	750	750,0001	698,5378	677,059	667,9633	664,6702	664,2978	665,4479	667,3926	669,7346	672,2501	674,8104	677,3416	679,8019	682,1683	684,4299	686,5826	688,6266
	1000	1000	931,3838	902,7453	890,6177	886,2269	885,7305	887,2638	889,8568	892,9795	896,3334	899,7472	903,1222	906,4025	909,5578	912,5732	915,4435	918,1687
	1250	1250	1164,23	1128,432	1113,272	1107,784	1107,163	1109,08	1112,321	1116,224	1120,417	1124,684	1128,903	1133,003	1136,947	1140,717	1144,304	1147,711
	1500	1500	1397,076	1354,118	1335,927	1329,34	1328,596	1330,896	1334,785	1339,469	1344,5	1349,621	1354,683	1359,604	1364,337	1368,86	1373,165	1377,253
	1750	1750	1629,922	1579,804	1558,581	1550,897	1550,028	1552,712	1557,249	1562,714	1568,583	1574,558	1580,464	1586,204	1591,726	1597,003	1602,026	1606,795
	2000	2000	1862,768	1805,491	1781,235	1772,454	1771,461	1774,528	1779,714	1785,959	1792,667	1799,494	1806,244	1812,805	1819,116	1825,146	1830,887	1836,337
	2250	2250	2095,613	2031,177	2003,89	1994,011	1992,894	1996,344	2002,178	2009,204	2016,75	2024,431	2032,025	2039,406	2046,505	2053,29	2059,748	2065,88
	2500	2500	2328,459	2256,863	2226,544	2215,567	2214,326	2218,16	2224,642	2232,449	2240,834	2249,368	2257,805	2266,006	2273,894	2281,433	2288,609	2295,422
	2750	2750	2561,305	2482,55	2449,199	2437,124	2435,759	2439,975	2447,106	2455,694	2464,917	2474,305	2483,586	2492,607	2501,284	2509,576	2517,469	2524,964
	3000	3000	2794,151	2708,236	2671,853	2658,681	2657,191	2661,791	2669,57	2678,939	2689	2699,242	2709,366	2719,207	2728,673	2737,72	2746,33	2754,506
	3250	3250	3026,997	2933,922	2894,508	2880,238	2878,624	2883,607	2892,034	2902,183	2913,084	2924,178	2935,147	2945,808	2956,063	2965,863	2975,191	2984,048
	3500	3500	3259,843	3159,609	3117,162	3101,794	3100,057	3105,423	3114,499	3125,428	3137,167	3149,115	3160,928	3172,409	3183,452	3194,006	3204,052	3213,591
	3750	3750	3492,689	3385,295	3339,816	3323,351	3321,489	3327,239	3336,963	3348,673	3361,25	3374,052	3386,708	3399,009	3410,842	3422,15	3432,913	3443,133
	4000	4000	3725,535	3610,981	3562,471	3544,908	3542,922	3549,055	3559,427	3571,918	3585,334	3598,989	3612,489	3625,61	3638,231	3650,293	3661,774	3672,675
	4250	4250	3958,381	3836,667	3785,125	3766,464	3764,354	3770,871	3781,891	3795,163	3809,417	3823,926	3838,269	3852,211	3865,621	3878,436	3890,635	3902,217
4500	4500	4191,227	4062,354	4007,78	3988,021	3985,787	3992,687	4004,355	4018,408	4033,5	4048,862	4064,05	4078,811	4093,01	4106,58	4119,496	4131,759	
4750	4750	4424,073	4288,04	4230,434	4209,578	4207,22	4214,503	4226,82	4241,653	4257,584	4273,799	4289,83	4305,412	4320,399	4334,723	4348,356	4361,302	
5000	5000	4656,919	4513,726	4453,089	4431,135	4428,652	4436,319	4449,284	4464,898	4481,667	4498,736	4515,611	4532,012	4547,789	4562,866	4577,217	4590,844	

Tabella 3.6.3.3 – Valori di MTTF con $\beta > 1$

Grazie a questa tabella è possibile creare una mappa degli MTF:

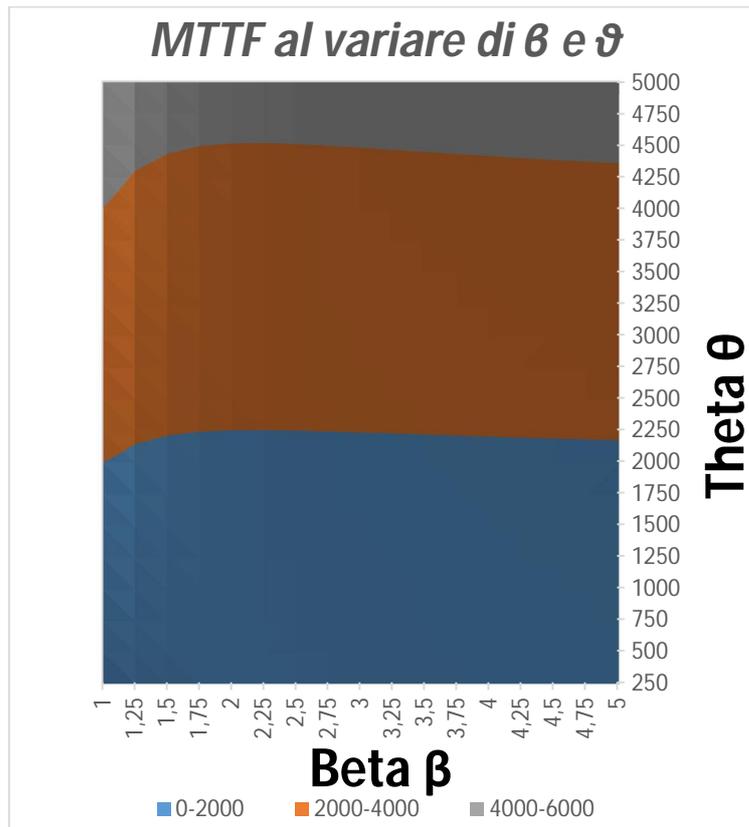


Figura 3.6.3.4 – Mappa degli MTF per le varie combinazioni si β e θ

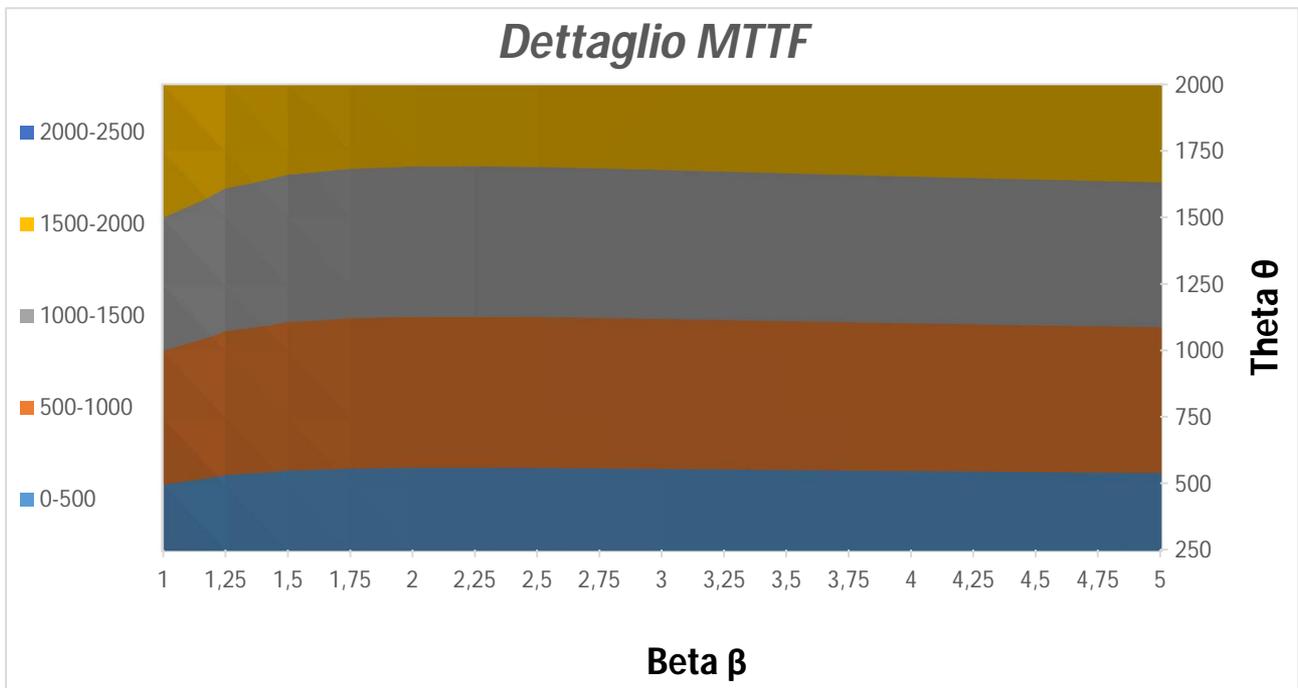


Figura 3.6.3.5 – Dettaglio mappa MTF

Le mappe così composte consentono, sulla base dell' *MTTF* che si sta cercando, di definire i valori di β e θ che garantiranno il minimo dei costi unitari attesi $UEC(t_p)$.

3.6.4 Stima valori di $UEC(t_p)$

Note quindi le coppie di valori di β e di θ che permettono di garantire l' $MTTF$ di prima ipotesi è possibile andare ad applicarli al foglio excel 3.6.1.2 per il calcolo dei costi unitari attesi $UEC(t_p)$. Per comprendere al meglio questo passaggio ipotizzando quindi di dover garantire un $MTTF$ pari a 1000 ore; andando a riprendere la tabella 3.6.3.3 ricaviamo le coppie di β e di θ che soddisfano tale condizione:

MTTF*=1000h		BETA																				
		1	1,25	1,5	1,75	2	2,25	2,5	2,75	3	3,25	3,5	3,75	4	4,25	4,5	4,75	5	5,25	5,5	5,75	6
THETA	900	900	838,2454	812,4708	801,556	797,6042	797,1574	798,5374	800,8711	803,6816	806,7001	809,7725	812,8099	815,7622	818,602	821,3159	823,8911	826,3519	828,6776	830,8813	832,9691	834,9474
	950	950	884,8146	857,608	846,0868	841,9156	841,4439	842,9006	845,3639	848,3305	851,5168	854,7598	857,9661	861,0824	864,0799	866,9446	869,6713	872,2603	874,7152	877,0414	879,2451	881,3334
	1000	1000	931,3838	902,7453	890,6177	886,2269	885,7305	887,2638	889,8568	892,9795	896,3334	899,7472	903,1222	906,4025	909,5578	912,5732	915,4435	918,1687	920,7528	923,2014	925,5212	927,7193
	1150	1150	1071,091	1038,157	1024,21	1019,161	1018,59	1020,353	1023,335	1026,926	1030,783	1034,709	1038,59	1042,363	1045,991	1049,459	1052,76	1055,894	1058,866	1061,682	1064,349	1066,877
1200	1200	1117,661	1083,294	1068,741	1063,472	1062,877	1064,717	1067,828	1071,575	1075,6	1079,697	1083,747	1087,683	1091,469	1095,088	1098,532	1101,802	1104,903	1107,842	1110,625	1113,263	

Tabella 3.6.4.1 – Valori di $MTTF$ al variare di β e θ tramite equazione di Weibull

Si va pertanto ad effettuare un ingrandimento della zona contenente $MTTF$ pari a 1000:

MTTF*=1000 h		BETA											
		2	2,25	2,5	2,75	3	3,25	3,5	3,75	4	4,25	4,5	4,75
THETA	1110	983,711	983,160	984,862		991,207	994,930	998,719	1002,466	1006,10	1009,60	1012,95	1016,14
		9	8	8	987,741	3	1	4	6	7	9	6	2
	1120	992,574	992,018	993,735	996,639	1000,13	1003,89	1007,71	1011,49	1015,17	1018,70	1022,08	1025,29
		2	1	5	6	7	3	7	7	1	5	2	7
	1130	1001,43	1000,87	1002,60	1005,53	1009,06	1012,85	1016,71	1020,52	1024,23		1031,20	1034,45
	6	5	8	8	7	7	4	8	5	1027,8	8	1	
1140	1010,29	1009,73	1011,48	1014,43	1017,99		1025,71	1029,55	1033,29	1036,89	1040,33	1043,60	
	9	3	1	7	7	1021,82	2	9	9	6	3	6	
1150	1019,16		1020,35	1023,33	1026,92	1030,78	1034,70		1042,36	1045,99	1049,45		
	1	1018,59	3	5	6	3	9	1038,59	3	1	9	1052,76	

Tabella 3.6.4.2 – Ingrandimento valori di $MTTF$ per gruppo ristretto di θ

Si ritaglia la tabella con i valori di β e di θ che meglio approssimano l' $MTTF$ pari a 1000:

MTTF*=1000 h		BETA							
		2	2,25	2,5	2,75	3	3,25	3,5	3,75
THETA	1110	983,711	983,160	984,862		991,207	994,930	998,719	1002,466
		9	8	8	987,741	3	1	4	6
	1120	992,574	992,018	993,735	996,639	1000,13	1003,89	1007,71	1011,49
		2	1	5	6	7	3	7	7
	1130	1001,43	1000,87	1002,60	1005,53	1009,06	1012,85	1016,71	1020,52
	6	5	8	8	7	7	4	8	
1140	1010,29	1009,73	1011,48	1014,43	1017,99		1025,71	1029,55	
	9	3	1	7	7	1021,82	2	9	

Tabella 3.6.4.3 – Valori definitivi di β e θ per l'ottenimento di $MTTF=1000h$

Tramite la tabella 3.6.4.3 appena riportata è possibile creare anche una mappa degli *MTTF* che può tornar utile qual si voglia utilizzare un metodo grafico anziché matematico:

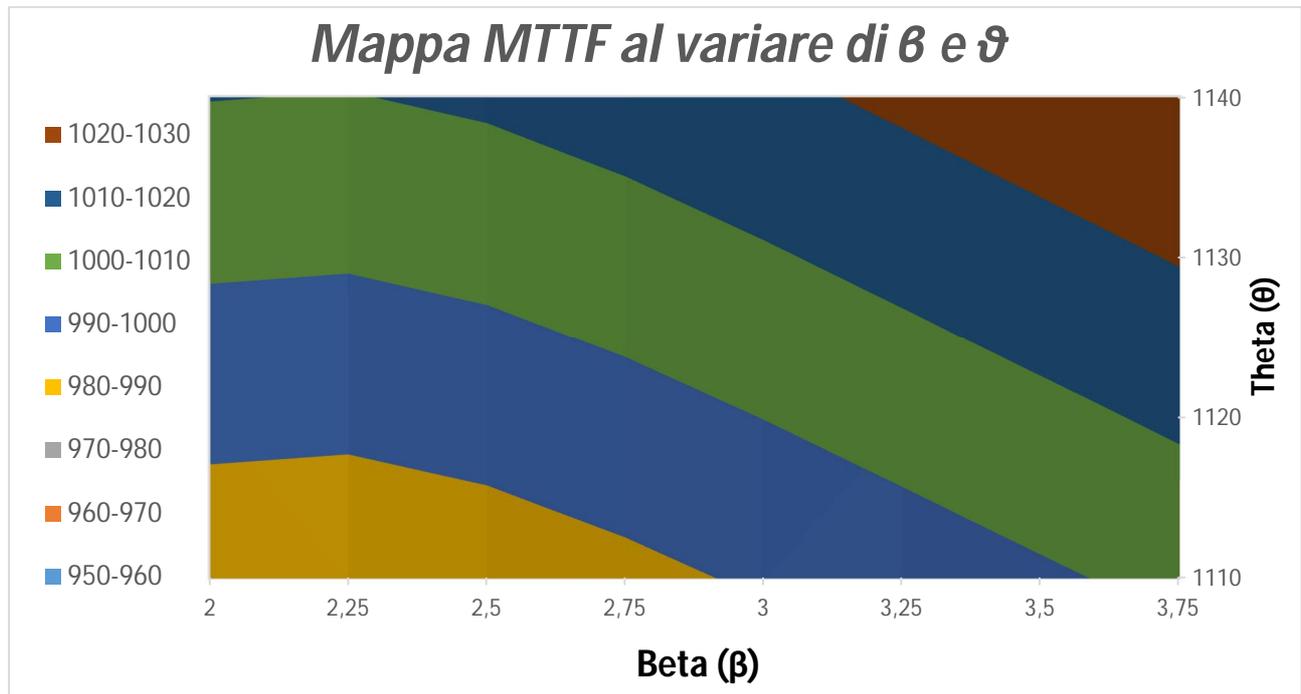


Figura 3.6.4.4 – Mappa degli MTTF al variare di β e θ

Con i valori di β e di θ che garantiscono un *MTTF* pari a 1000 è possibile andare a calcolare i valori degli *UEC* (t_p) sulla base dei costi riportati in tabella 3.6.1.2:

Cop	40 €/h
Nop	2 manutentori
MTTR std	1 h
Cricambi	150 €/intervento
MTTR guasto	1,5 h
Cfermo prod	2500 €/h

Cp	230 €/intervento
Cf	3980 €/intervento
Cf/Cp	17,30434783

Otteniamo quindi i seguenti valori (al variare di β per θ che garantisce $MTTF=1000$):

		BETA							
		2	2,25	2,5	2,75	3	3,25	3,5	3,75
MTTF=1000 Cp=230 Cf=3980	theta (θ)	1128,379	1129,012	1127,06	1123,776	1119,847	1115,656	1111,423	1111,423
	tp	281	297	314	333	351	369	386	403
	UEC(tp)	1,65455447	1,40604499	1,22605893	1,0910625	0,98676752	0,9041552	0,83732037	0,77934717
	UEC(tp)* θ	1866,96479	1587,44117	1381,84259	1226,11024	1105,02818	1008,72642	930,617393	866,184627

Tabella 3.6.4.5 – Valori di θ , t_p , $UEC(t_p)$ e $UEC(t_p) \cdot \theta$ al variare di β per $MTTF=1000$ e $C_p = 230€$ e $C_f = 3980€$

Come si può vedere il t_p che minimizza i costi è riferito all' $MTTF$ di primo tentativo che si era imposto e il suo andamento crescente all'aumentare di β indica pertanto due aspetti:

1. Se si vuol mantenere $MTTF$, come viene rappresentato nella prima riga, occorrerà valutare un nuovo θ .

Essendo θ un parametro di scala sarà riferito alla resistenza del componente: θ maggiori sono riferiti a componenti più resistenti e viceversa.

Si ottiene pertanto che:

2. Se si vuol mantenere un ben preciso θ sarà necessario valutare un nuovo $MTTF$ o rivalutare l'usura del componente (β).

I costi unitari attesi infatti decrescono all'aumentare di β ma, mantenendo un θ costante comporterebbero delle manutenzioni più frequenti:

$$MTTF_{ottimale} = f[t_p(\beta), \beta, \theta]$$

L'espressione appena indicata sta a significare che l'effettivo t_p da utilizzare sarà in base al β scelto. La scelta del β dovrà per forza di cose esser affinata con i primi controlli e visite tecniche (imposti ad un tempo nettamente inferiore a $MTTF$) che andranno a valutare costantemente l'usura del componente.

Si conclude andando quindi a determinare le variazioni degli $UEC(t_p)$ nel caso in cui si dovesse valutare un β differente (pertanto l' $UEC(t_p)$ ottenuto al t_p corrispondente al nuovo β da quello previsto a parità di θ per il mantenimento di $MTTF$ pari a 1000:

$MTTF=1000$	$UEC(t_p)$	2	2,25	2,5	2,75	3	3,25	3,5	3,75
	t_p	281	297	314	333	351	369	386	403
2	281	1,65455447	1,6570187	1,66437156	1,67741174	1,69368909	1,7131658	1,73405124	1,75700255
2,25	297	1,40854161	1,40604499	1,40878552	1,41743724	1,43026909	1,44696118	1,46579696	1,4872382
2,5	314	1,23722845	1,22895938	1,22605893	1,22899973	1,23699213	1,24939255	1,26467074	1,2830285
2,75	333	1,116862	1,10285402	1,09417553	1,0910625	1,09372571	1,10120272	1,11221167	1,12667633
3	351	1,03175292	1,01246639	0,99834934	0,98939093	0,98676752	0,98922443	0,995755	1,0060125
3,25	369	0,97129131	0,94736959	0,92838081	0,91407208	0,98939093	0,9041552	0,90630646	0,91235787
3,5	386	0,92818557	0,90031673	0,87710332	0,85806395	0,98939093	0,83927061	0,83732037	0,83935916
3,75	403	0,89736729	0,86620968	0,83941566	0,81629348	0,98939093	0,78963016	0,78394924	0,77934717

Tabella 3.6.4.6 – Variazioni di $UEC(t_p)$ per β differenti

Si riportano pertanto altri indici di variazione:

$MTTF=1000$	$UEC(t_p) \cdot \theta$	2	2,25	2,5	2,75	3	3,25	3,5	3,75
	t_p	281	297	314	333	351	369	386	403
2	281	1866,96	1869,75	1878,04	1892,76	1911,12	1933,10	1956,67	1982,57
2,25	297	1590,26	1587,44	1590,54	1600,30	1614,79	1633,64	1654,90	1679,11
2,5	314	1394,43	1385,11	1381,84	1385,16	1394,16	1408,14	1425,36	1446,05
2,75	333	1255,10	1239,36	1229,61	1226,11	1229,10	1237,51	1249,88	1266,13
3	351	1155,40	1133,81	1118,00	1107,97	1105,03	1107,78	1115,09	1126,58
3,25	369	1083,63	1056,94	1035,75	1019,79	1103,82	1008,73	1011,13	1017,88
3,5	386	1031,61	1000,63	974,83	953,67	1099,63	932,78	930,62	932,88
3,75	403	997,35	962,73	932,95	907,25	1099,63	877,61	871,30	866,18

Tabella 3.6.4.7 - Variazioni di $UEC(t_p) \cdot \theta$ per β differenti

Nella tabella seguente viene valutata la differenza tra l' $UEC(t_p) \cdot \theta$ e quello riferito ad un altro beta l' $UEC(t_p^*) \cdot \theta$:

MTTF=1000	$\Delta UEC(t_p) \cdot \theta$	2	2,25	2,5	2,75	3	3,25	3,5	3,75
	t_p	281	297	314	333	351	369	386	403
2	281	0,000	2,781	11,077	25,792	44,159	66,136	89,703	115,600
2,25	297	2,819	0,000	3,094	12,862	27,349	46,195	67,461	91,668
2,5	314	12,589	3,269	0,000	3,314	12,322	26,298	43,518	64,208
2,75	333	28,993	13,251	3,498	0,000	2,993	11,395	23,767	40,022
3	351	50,377	28,779	12,970	2,938	0,000	2,751	10,065	21,551
3,25	369	74,901	48,212	27,027	11,064	95,094	0,000	2,400	9,151
3,5	386	100,990	70,016	44,216	23,055	169,015	2,168	0,000	2,266
3,75	403	131,170	96,541	66,762	41,063	233,448	11,429	5,115	0,000

Tabella 3.6.4.8 – Variazioni espresse come differenza tra il valore ottimo (valori pivot) e i valori per β differenti

Si conclude con una visione di variazione in percentuale data dall'equazione:

$$\Delta UEC(t_p)\theta\% = \frac{UEC(t_p) \cdot \theta}{UEC(t_p^*) \cdot \theta}$$

MTTF=1000	$\frac{UEC(t_p)\theta}{UEC(t_p^*)\theta}$	2	2,25	2,5	2,75	3	3,25	3,5	3,75
	t_p	281	297	314	333	351	369	386	403
2	281	1	0,9985128	0,9941016	0,9863734	0,9768938	0,9657877	0,9541554	0,9416915
2,25	297	0,9982275	1	0,9980546	0,9919627	0,9830632	0,9717226	0,9592358	0,9454067
2,5	314	0,9909721	0,9976399	1	0,9976071	0,9911614	0,9813240	0,9694688	0,9555975
2,75	333	0,9769000	0,9893081	0,9971549	1	0,9975650	0,9907916	0,9809845	0,9683903
3	351	0,9563990	0,9746175	0,9883990	0,9973484	1	0,9975163	0,9909742	0,9808700
3,25	369	0,9308795	0,9543848	0,9739055	0,9891508	0,9138503	1	0,9976263	0,9910093
3,5	386	0,9021044	0,9300286	0,9546428	0,9758251	0,8462988	0,9976762	1	0,9975710
3,75	403	0,8684818	0,8997211	0,9284401	0,9547389	0,7877039	0,9869774	0,9941296	1

Tabella 3.6.4.9 – Valori espressi come rapporto tra l' $UEC(t_p) \cdot \theta$ ottimo e $UEC(t_p) \cdot \theta$ riferito al nuovo β

L'ente manutentivo in questo modo ha a disposizione una finestra di costi unitari, che potrebbero esser richiesti nel caso in cui il componente dovesse presentare fenomeni di usura (β) differenti, obbligando pertanto ad una rivalutazione dell' $MTTF$ prescelto e successiva iterazione del metodo appena esposto.

CAPITOLO 4. Caso Studio: Manutenzione Preventiva in Sistemi Territoriali S.p.A.

4.1 Introduzione

L'utilizzo di un caso studio consente di avere un riscontro pratico della teoria vista fino ad ora ovvero, mostrare una possibilità applicativa del metodo di stima dell'*MTTF* che ottimizzi i costi di manutenzione in assenza di dati.

In tal senso, si procederà ad analizzare alcuni dei guasti più ricorrenti per un specifica tipologia di rotabili in forza a Sistemi Territoriali S.p.A.

I guasti cui si farà riferimento sono pertanto stati selezionati sulla base delle esperienze maturate durante la condotta degli stessi e sulle analisi effettuate in officina assieme al personale di manutenzione dopodiché.

Attraverso l'analisi di Weibull, come anticipato precedentemente, tramite una prima stima di *MTTF* da parte dei manutentori si andranno ad ottenere per i componenti in esame i valori di β e θ che, in base alla politica manutentiva, si cercherà di scegliere permetteranno di ottimizzare i costi di manutenzione degli stessi.

4.2 GTW 2/6 (ATR 110/116) e GTW 4/12 (ATR 120/126)

4.2.1 Specifiche Tecniche

Come specificato nel primo capitolo la flotta dei mezzi utilizzati da Sistemi Territoriali S.p.A. comprende automotrici Stadler GTW 2/6 e 4/12 che saranno oggetto di studio per questa analisi.

Andando a riprendere i dati tecnici abbiamo che:

Il GTW è un'automotrice articolata a trazione diesel-elettrica per il trasporto ferroviario regionale. Si contraddistingue per la sua struttura modulare con una netta separazione funzionale tra equipaggiamento motore e compartimenti passeggeri.

Le vetture offrono ampi scompartimenti per i viaggiatori e spaziose piattaforme di accesso. Un'area polifunzionale per passeggini e biciclette si trova in una delle semicasse. La stessa area è anche dotata di una toilette per disabili.

Gli accessi sono predisposti per marciapiedi con un'altezza di 550 mm.

Il veicolo è concepito per viaggiare in trazione multipla nelle configurazioni che verranno specificate qui nel seguito.

Al momento dell'allestimento del veicolo, è stata prestata una particolare attenzione alla semplificazione delle operazioni di manutenzione. Tutti i componenti nel modulo di trazione che necessitano di manutenzione sono disposti in modo tale da permetterne l'accesso tramite porte o portelli a cerniera.



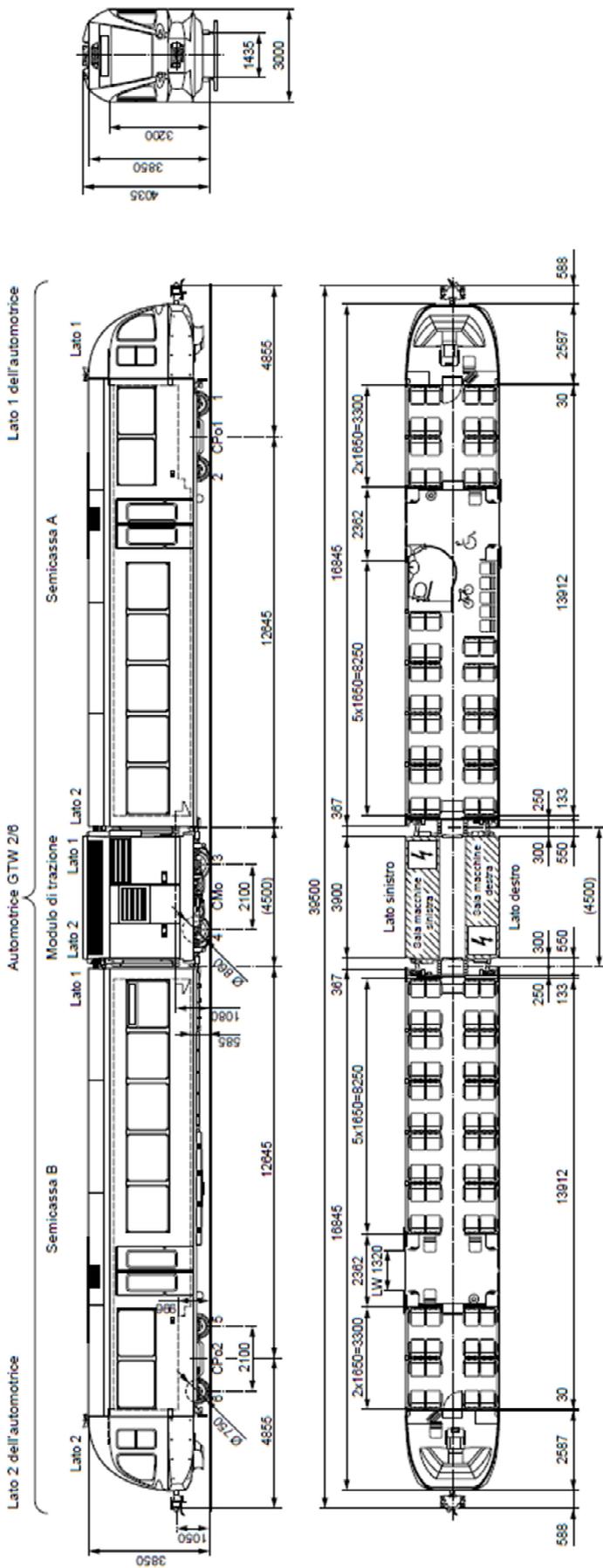
Figura 4.2.1 - GTW 2/4 ATR 110 Sistemi Territoriali S.p.A.



Figura 4.2.2 - GTW 4/12 ATR 120 Sistemi Territoriali S.p.A.

Caratteristiche veicolo	GTW2/6	GTW 4/12
<i>Scartamento</i>	1435 mm	
<i>Lunghezza aggancio (Frontale compreso)</i>	39,5 m	77,33 m
<i>Larghezza veicolo</i>	3000 mm	
<i>Altezza del veicolo</i>	3850 mm	
<i>Larghezza degli accessi</i>	1320 mm	
<i>Sforzo di compressione longitudinale</i>	1500 kN	
<i>Posti a sedere: Fissi</i>	102	245
<i>Posti a sedere: Strapuntini</i>	9	15
<i>Posti in piedi: 4 persone / m²</i>	106	214
<i>Peso a vuoto in ordine di marcia</i>	68 t	66t + 66t
<i>Massa a pieno carico</i>	83 t	82 t + 82 t
<i>Peso frenato a vuoto</i>	87 t	86 t + 86 t
<i>Peso frenato a pieno carico</i>	108 t	107 t + 107 t
<i>Disposizione degli assi</i>	2'Bo'2	2'Bo'2'2'Bo'2
<i>Passo carrelli</i>	2100 mm	
<i>Diametro ruote motrici</i>	860 mm	
<i>Diametro ruote portanti</i>	750 mm	
<i>Velocità massima (di omologazione)</i>	140 km/h	
<i>Accelerazione massima</i>	1,05 m/s ²	1,05 m/s ²
<i>Potenza motori Diesel</i>	2 x 390 kW	4 x 390 kW
<i>Sforzo trazione all'avviamento</i>	80 kN	80 kN
<i>Raggio di iscrizione in curva nell'esercizio normale</i>	250 m	250 m
<i>Raggio di iscrizione in curva su binari di officina (con tara veicolo)</i>	100 m	100 m

Tabella 4.2.3 – Caratteristiche tecniche GTW 2/6 e GTW 4/12 – ATR 110/120



Posti a sedere nel GTW 2/6

	Piano ribassato	Piano normale	Totale	Strapuntini
Semicassa A	30	16	46	6
Semicassa B	40	16	56	3
Semicasse A+B			102	9
Posti a sedere in totale			111	(=102+9)
Superficie totale per posti in piedi			26.5 m ²	

SI-FUC-GTW DMU II 2/6

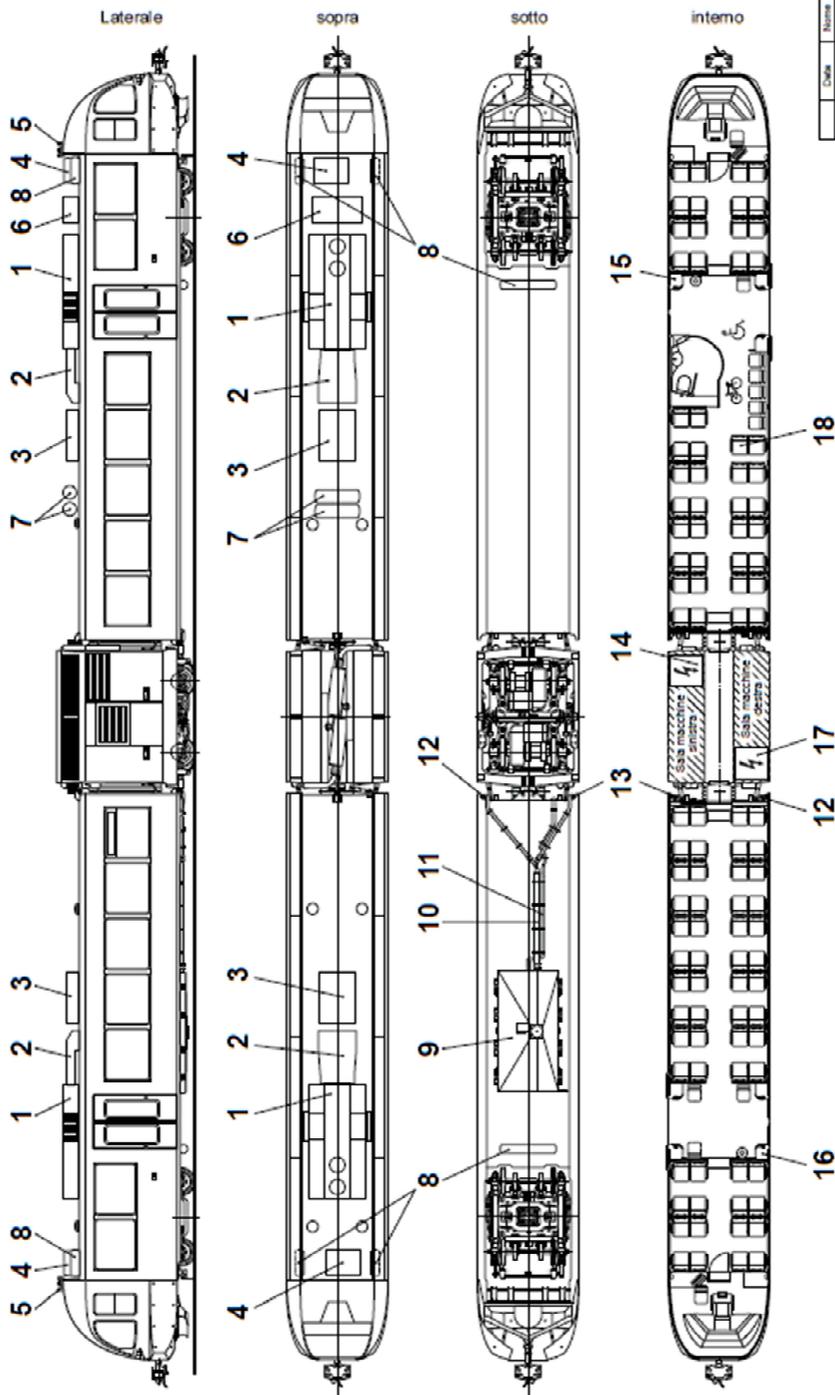
Figurino tecnico

STADLER L4126-D01-2 it

STADLER
Stadler Rail Engineering AG, CH-3000 Châtenay, Switzerland

Foglio
1
T.F.

Schema 4.3.4 – Figurino tecnico GTW 2/6 ATR



- 1 Impianto climatizzatore passeggeri
- 2 Canale aria condizionata con silenziatore
- 3 Reostati di frenatura
- 4 Impianto climatizzatore cabina di guida
- 5 Tromba bilonale
- 6 Cassone produzione aria (Compressore)
- 7 Serbatoi principali aria compressa, 2 x 150 litri
- 8 Serbatoi ausiliari aria compressa
- 9 Serbatoio carburante diesel 1500 litri
- 10 Condotte di rifornimento carburante
- 11 Condotte di alimentazione motori diesel
- 12 Boomerone di rifornimento destro
- 13 Boomerone di rifornimento sinistro
- 14 Quadro pneumatico PTM, centralina antipattinamento
- 15 Quadro pneumatico PTF 1
- 16 Quadro pneumatico PTF 2
- 17 Batteria 24 V, serbatoio intermedio Diesel
- 18 Maschera di soccorso

Disegnato	28.02.2002	MM
Verificato	28.02.2002	MM
STADLER <small>Stadler Rail Engineering AG, CH-6050 Emmen, Svizzera</small>		
SI-FUC-GTW DMU II 2/6		
Disposizione apparecchiature		
L4126-D01-4 it		
Foglio		1/1

Schema 4.3.5 – Disposizione apparecchiature GTW 2/6 ATR 110

4.2.2 Architettura delle casse

Le casse hanno una larghezza di 3.000 mm e offrono lo spazio per una disposizione confortevole dei sedili di tipo 2 + 3.

Le casse sono realizzate in alluminio. La costruzione in alluminio è possibile in quanto le casse sono concepite senza componenti ingombranti, senza aperture e pesanti carichi sottocassa o sul padiglione. Pertanto, le forze che agiscono sulla struttura sono relativamente poche. Rispetto a un veicolo analogo costruito in acciaio, la struttura leggera premette un notevole risparmio di carburante.

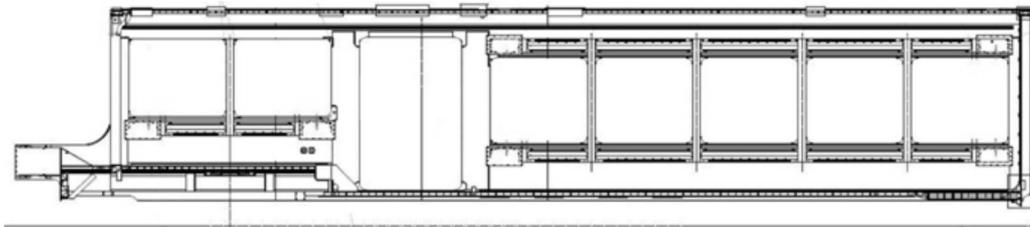


Figura 4.2.2.1 – Carrozza di testa e coda (munita poi di cabina di guida)

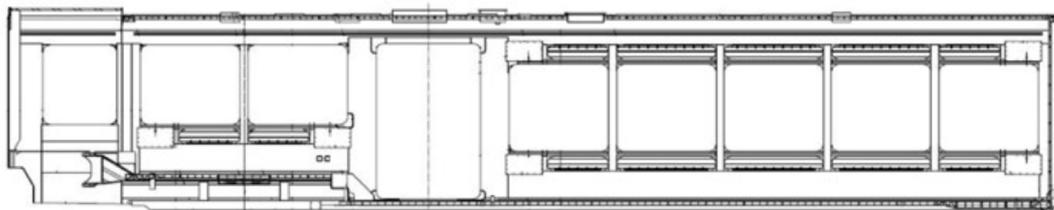


Figura 4.2.2.2 – Rimorchio intermedio (per veicoli GTW 4/12)

Le casse sono costituite dai seguenti sottoassiemi:

- La parte a pianale ribassato ha una lunghezza di 10.600 mm ed è costituita da un vestibolo con le porte di accesso e 5 x 2 compartimenti passeggeri e presenta un'altezza pavimento di 586 mm dal piano del ferro.
- La parte a pianale rialzato ha una lunghezza di 3.300 mm ed è costituita da 2 x 2 compartimenti passeggeri e presenta un'altezza pavimento di 1.000 mm dal piano del ferro.

La parte a pianale ribassato e quella a pianale rialzato sono collegate tra di loro mediate due gradini.

I moduli dei vagoni viaggiatori sono completamente realizzati in alluminio, mentre il modulo di trazione è costituito da una struttura d'acciaio saldata.

4.2.3 Architettura della testa del veicolo

La parte frontale della semicassa è stata progettata in base a principi aerodinamici e dona all'automotrice un aspetto moderno.

La testa del veicolo è realizzata in resina rinforzata con fibra di vetro adottando il metodo di tipo a sandwich. Il pavimento è costituito da pannelli in legno rivestiti con lamiera in acciaio inossidabile. La cabina guida appoggia sulla parte anteriore della scocca della cassa ed è fissata alla struttura della semicassa mediante una colla poliuretanica per materiali sintetici. La cabina guida è realizzata secondo la normativa UIC 651.

4.2.4 Architettura del modulo di trazione

Il modulo di trazione largo 3.000 mm e lungo 4.500 mm è realizzato in acciaio. La scocca della cassa è costituita da un telaio base e profilati per le pareti laterali e la parte superiore. La struttura tiene conto delle sollecitazioni tipiche dei veicoli ferroviari e di carichi dinamici generati dal gruppo del motore di trazione.

La struttura dei componenti è progettata per garantire la massima resistenza alla corrosione. Si sono evitate superfici su cui si possono accumulare sporcizia, ghiaccio o neve; per questo motivo sono state progettate un numero sufficiente di scarichi per l'acqua.

Il telaio base è costituito da longheroni, traverse e traversine aggiuntive. La disposizione dei supporti offre condizioni ottimali per il collegamento con il carrello e il montaggio dell'equipaggiamento di trazione. Gli elementi portanti del modulo di trazione sono realizzati in acciaio ad alto resistenziale e saldati conformemente alla norma EN 6700.

Sulle pareti laterali sono montati degli sportelli di grandi dimensioni realizzati in un materiale composito di tipo a sandwich. Questi consentono un ottimo accesso a tutti gli apparecchi che richiedono interventi di manutenzione.

I canali d'aria per la refrigerazione sono di alluminio.

L'unità "propulsore termico-generatore" può essere smontata/montata dal lato.

Il modulo di trazione è costituito da due locali macchine divisi tra di loro da uno spazio netto largo ca. 850 mm disposto simmetricamente rispetto all'asse longitudinale. L'altezza del pavimento dal piano del ferro è di ca. 1.000 mm. Lo spazio netto consente il passaggio ai passeggeri e al macchinista di mantenere il contatto visivo da una semicassa all'altra.

I rumori prodotti dagli impianti di trazione sono acusticamente isolati da specifici pannelli fonoassorbenti ottimamente distribuiti nel modulo di trazione e nei vestiboli delle semicasse.

Tutti i materiali fonoisolanti nonché le guarnizioni degli sportelli e dei punti di appoggio delle macchine rispettano gli elevati requisiti relativi alla protezione antirumore e antincendio.

I treni sono dotati di un sistema di aggancio frontale automatico di tipo SCHAKU per i modelli ATR 110/120, di tipo SCHARFENBERG per gli ATR 116/126.

Questo sistema di aggancio permette di accoppiare automaticamente più veicoli e ottenere così diverse composizioni. Con questo non s'intende solo l'accoppiamento meccanico, ma anche la connessione dei circuiti pneumatici ed elettrici per il comando del treno.

4.2.5 Foto complessive di cassa, testate e modulo di trazione



Schema 4.2.5 – a) Struttura grezza modulo semicassa



Schema 4.2.5 – b) Cabina di guida in PRFV



Schema 4.2.5 – c) Struttura del modulo di trazione in acciaio

4.2.6 Aggancio Frontale SHAKU e SCHARFENBERG

Con l'aggancio frontale è possibile accoppiare e staccare i singoli veicoli. In tal caso, sulla testa dell'organo di aggancio viene realizzato un raccordo meccanico, pneumatico ed elettrico solidale. In questo modo è possibile variare le composizioni di esercizio in base alle richieste di servizio (turni feriali, festivi e straordinari); tipico esempio è la composizione che viene utilizzata durante il carnevale di Venezia dove vengono impiegati in telecomando 1 treno GTW 4/12 e 1 treno GTW 2/6.

Le composizioni sono tuttavia vincolate alla serie del veicolo, infatti:

ATR 110 ↔ ATR 120

ATR 116 ↔ ATR 126

Le tipiche composizioni possibili sono pertanto

- 1 ATR 110 + 1 ATR 120
- 1 ATR 116 + 1 ATR 126
- 1 ATR 110 + 1 ATR 110
- 1 ATR 116 + 1 ATR 116

Le composizioni con serie differenti possono essere effettuate solamente per soccorso in linea dove si effettua l'esclusivo collegamento meccanico e pneumatico (tramite condotta flessibili) a causa delle differenze costruttive degli accoppiamenti elettrici delle logiche di comando.

Per una maggior sicurezza di esercizio risulta inoltre possibile staccare manualmente gli agganci frontali tramite dispositivo a fune che, mediante trazione dello stesso, è possibile effettuare il disaccoppiamento meccanico nel caso non sia possibile effettuare quello automatico attraverso specifico comando alloggiato nel banco di guida.

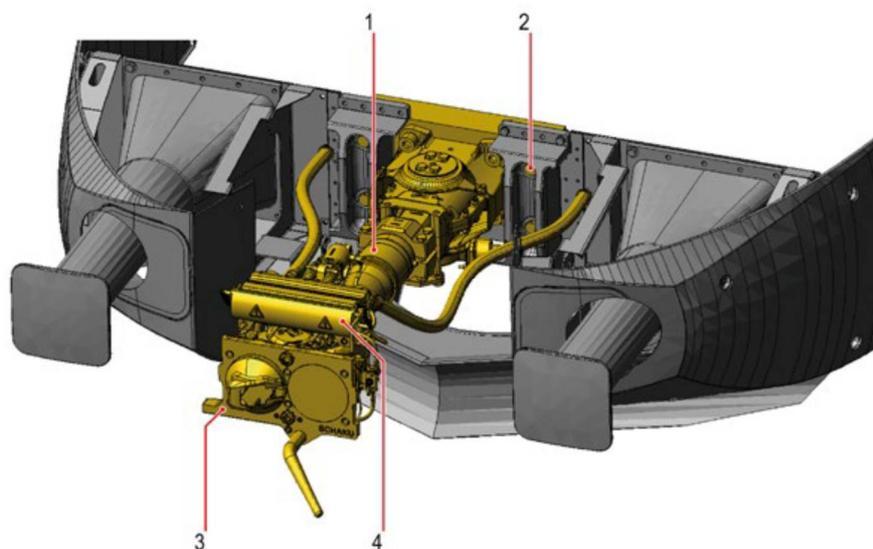


Figura 4.2.6.1 – Aggancio frontale Scharfenberg che equipaggia ciascuna testata dei ATR 116/126

<i>Abbreviazione</i>	<i>Denominazione</i>
1	Dispositivo di trazione e spinta
2	Elemento di strappo
3	Testa dell'accoppiamento
4	Scatola portacontatti

Come già anticipato, per gli ATR 110/120 sono installati accoppiatori automatici tipo Schaku con testa tipo 10 (resistenza di traino 1'000 kN, pressione 1'350 kN), mentre per gli ATR 116/126 vengono utilizzati accoppiatori automatici Scharfenberg, entrambi muniti di con accoppiamento elettrico e pneumatico (la cui disposizione geometrica cambia a seconda dei due modelli) e con dispositivo di sgancio automatico dalla cabina di guida.

La testa dell'accoppiatore è dotata di riscaldamento per consentire lo scioglimento di eventuale ghiaccio che potrebbe formarsi alle basse temperature inibendo il meccanismo di vincolo meccanico oltre che otturare le condotte pneumatiche della condotta generale (CG, in rosso, per il comando della frenatura pneumatica) e principale (CP, in giallo, per i sistemi pneumatici e i serbatoi ausiliari).

L'altezza sul piano del ferro della testa è di 1'050 mm.

Anche se durante l'accoppiamento tra due veicoli viene specificato di effettuare l'accostamento a 1km/h il costruttore prevede una velocità massima di accoppiamento in esercizio di 5 km/h. Nel caso in cui la velocità sia pari o superiore agli 8 km/h viene attivato irreversibilmente un apposito elemento di "sacrificio" per l'assorbimento energetico previsto in caso di collisione.

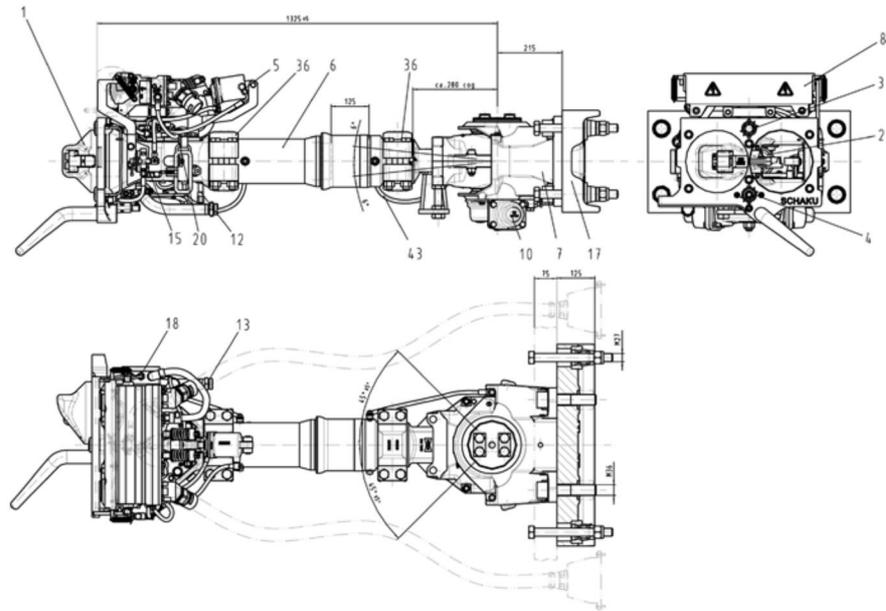


Figura 4.2.6.2 – Configurazione accoppiamento frontale

1	Testa dell'accoppiamento	12	Linea di disaccoppiamento
2	Cilindro di disaccoppiamento	13	Attacchi aria
3	Accoppiamento dell'aria	15	Componente pneumatico
4	Accoppiamento dell'aria	17	Sicurezza antiurto
5	Azionamento della scatola portacontatti	18	Componente elettrico
6	Biella di accoppiamento	20	Portamaniglia
7	Giunto elastico elastomerico	36	Manicotto di collegamento a conchiglie
8	Scatola portacontatti	43	Messa a terra
10	Posizione centrale		

4.2.7 Articolazione delle carrozze

Il collegamento tra cassa e modulo di trazione ha i seguenti compiti:

- Unione delle singole casse con l'ausilio di articolazioni sferiche.
- Trasmissione delle forze di trazione e spinta tra le casse.
- Passaggio sicuro e protetto dalle intemperie per persone tra il vagone e il modulo di

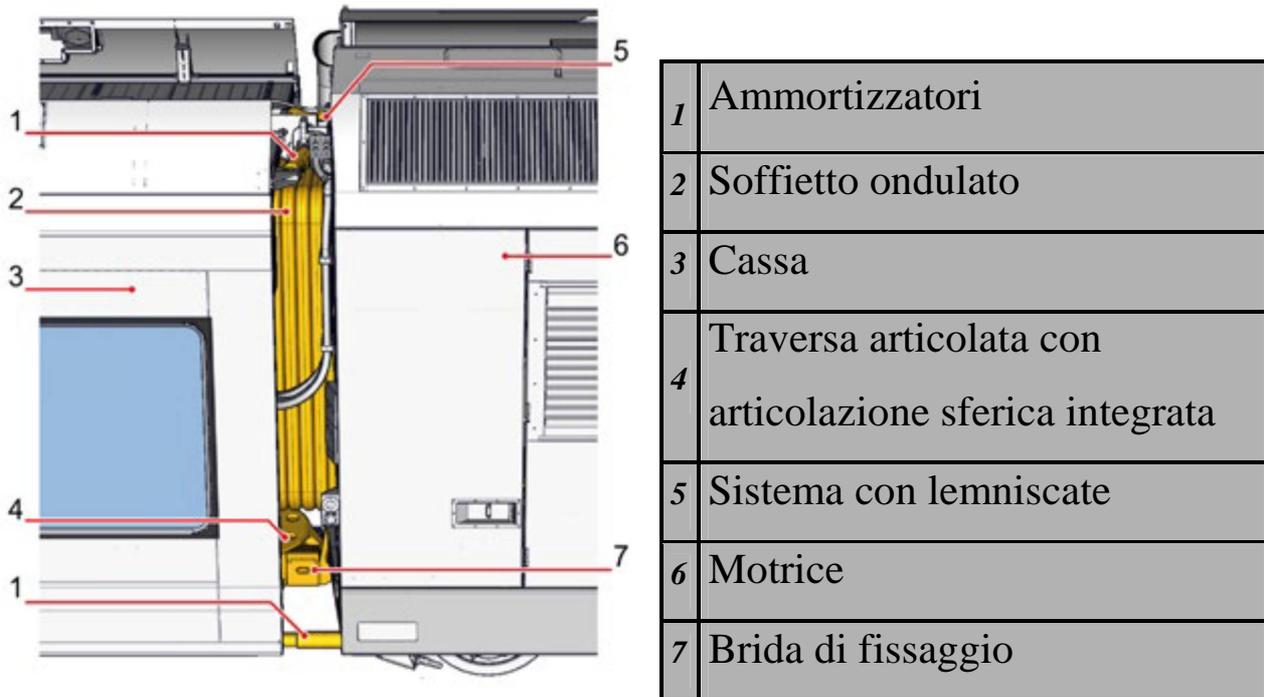


Figura 4.2.7.1 - Collegamento tra cassa e modulo di trazione

Le casse sono collegate tra loro tramite articolazioni sferiche, le quali trasmettono gli sforzi di trazione e di frenatura tra le parti della cassa. Anche le forze di supporto delle semicasse/intermedie sul modulo di trazione vengono trasmesse tramite questi supporti sferici.



Figura 4.2.7.2 - Articolazione sferica di collegamento tra semicassa e modulo motore

Per impedire una rotazione di beccheggio del modulo di trazione sul tetto del veicolo è installato un sistema con lemniscate, che guida e centra il modulo di trazione.

La lemniscata è installata sotto il tetto del modulo di trazione:

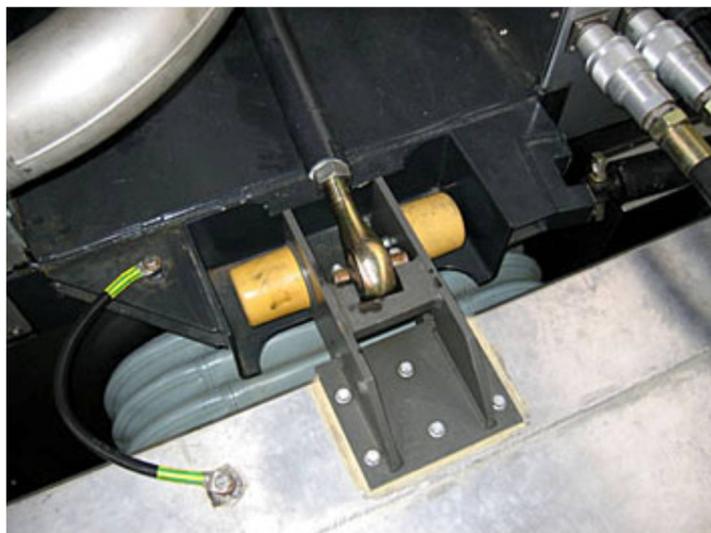


Figura 4.2.7.3 – Sistema di collegamento anti-beccheggio del modulo motore con le semicasse

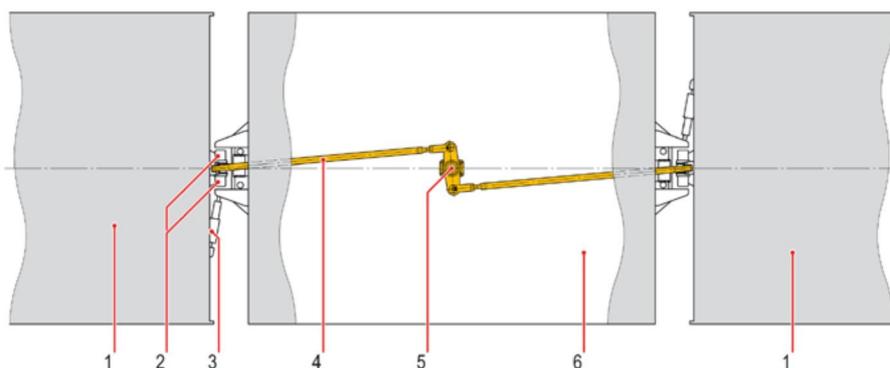


Figura 4.2.7.4 – Lemniscata del modulo di trazione (vista dall'alto)

<i>N°</i>	<i>Descrizione</i>	<i>N°</i>	<i>Descrizione</i>
1	Cassa	4	Lemniscata
2	Fermacarro	5	Punto di rotazione centrale della lemniscata
3	Ammortizzatore trasversale	6	Motrice

La disposizione dell'articolazione consente sia movimenti radiali in curva, sia movimenti verticali durante la marcia in salita e in pendenza, sia movimenti di torsione nelle curve di transizione.

Le casse sono sostenute tramite le superfici d'appoggio della sospensione pneumatica dei carrelli.

Le articolazioni sono concepite per curve in linea con un raggio fino a 100 m e fino a 80 m sui binari di officina.

4.2.8 Carrelli

Grazie alla loro concezione compatta, i carrelli costituiscono un sistema autonomo che consente di separare in modo semplice e rapido la cassa dagli organi di rotolamento.

I carrelli sono dotati di un sistema di sospensione a due stadi:

- **Sospensione primaria:** è il collegamento tra la sala montata (assile) e il telaio del carrello
- **Sospensione secondaria:** collegamento tra telaio del carrello e sottocassa (telaio) del veicolo

Nel caso degli Stadler GTW, come per gli altri veicoli ferroviari di ultima generazione il sistema di sospensione è costituito da una sospensione meccanica a molle elicoidali per la primaria e una sospensione pneumatica a cuscino d'aria per la secondaria.

Il sistema viene completato da sistemi di smorzamento a pistone idraulico per ridurre le oscillazioni e smorzare tutti i fenomeni di beccheggio e serpeggio che potrebbero innescarsi durante la corsa ad alta velocità.

In questo modo si ottiene un'elevata stabilità di marcia e confort per i passeggeri.

Nel dettaglio, la sospensione primaria collega gli assi al telaio del carrello mediante bielle di guida per gli assi, costituite da molle in acciaio e isolate acusticamente tramite elementi in gomma. La sospensione secondaria collega il telaio del carrello alla cassa con una sospensione pneumatica. Questa sospensione è inoltre dotata di un sistema di emergenza che consente di continuare la marcia in caso di perdita d'aria.

Sugli assi estremi di guida del veicolo è inoltre installato un sistema detto “ungibordo” per permettere la lubrificazione discontinua, a cadenza prefissata in base alla velocità di marcia, dei bordini di rotolamento sulla rotaia al fine di ridurre l'usura e il rumore nelle deviate e curve a raggio ridotto.

Tutte le ruote dei carrelli motore sono dotate inoltre di una lancia pneumatica per le sabbie al fine di migliorare il coefficiente di attrito ruota-rotaia in condizioni di scarsa aderenza che si possono verificare durante l'esercizio.

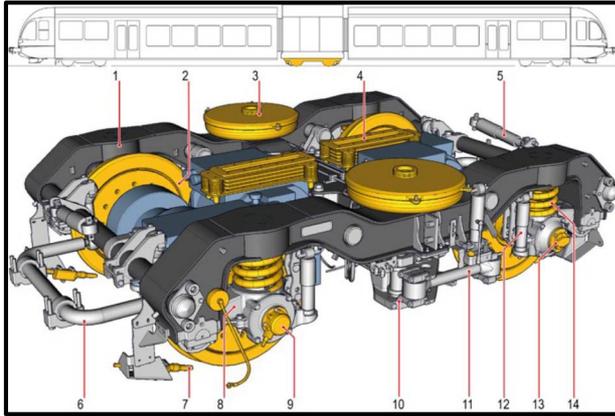


Figura 4.2.8.1 – Carrello Motore

4.2.8.1 Carrello motore

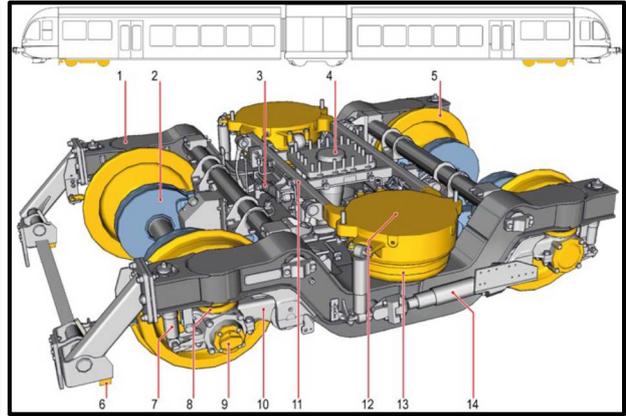
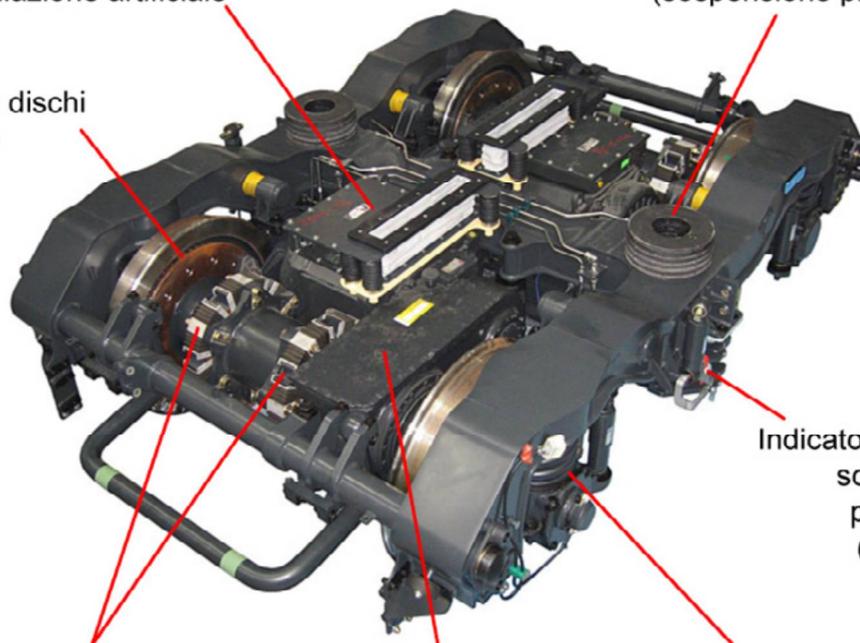


Figura 4.2.8.2 – Carrello Portante

Motore di trazione
con ventilazione artificiale

Appoggio sospensione secondaria
(sospensione pneumatica)

Sala con dischi
del freno



Indicatore di livello
sospensione
pneumatica
(vedi sotto)

Innesto a cuneo elastico

Trasmissione

Sospensione primaria

Figura 4.2.8.1.1 – Foto di dettaglio del carrello motore di cui viene equipaggiato il modulo centrale

Il carrello motore dispone di due assi a trasmissione e supporta i componenti di trazione, due motori di trazione asincroni montati trasversalmente al senso di marcia completamente molleggiati.

Il sistema così composto serve a sostenere il modulo di trazione, tramite il quale viene alimentato da degli inverter in grado di trasformare la corrente continua delle generatrici in corrente alternata per la gestione dei motori asincroni in grado di erogare una coppia massima di 40kN ciascuno.

L'impianto di frenatura del carrello motore comprende in tutto quattro unità di freni a disco montate sulle ruote, due per coppia di ruote, di cui due gruppi pinza del freno sono dotati di cilindri

del freno di stazionamento a molla. Inoltre tutte e quattro le ruote dispongono di dispositivi spandisabbia.

Come anticipato, attraverso uno speciale sistema di guide composto da lemniscata e braccio longitudinale vengono trasmesse le forze all'asta di trazione tra carrello motore e casse del modulo di trazione.

Diagramma forza di trazione-velocità

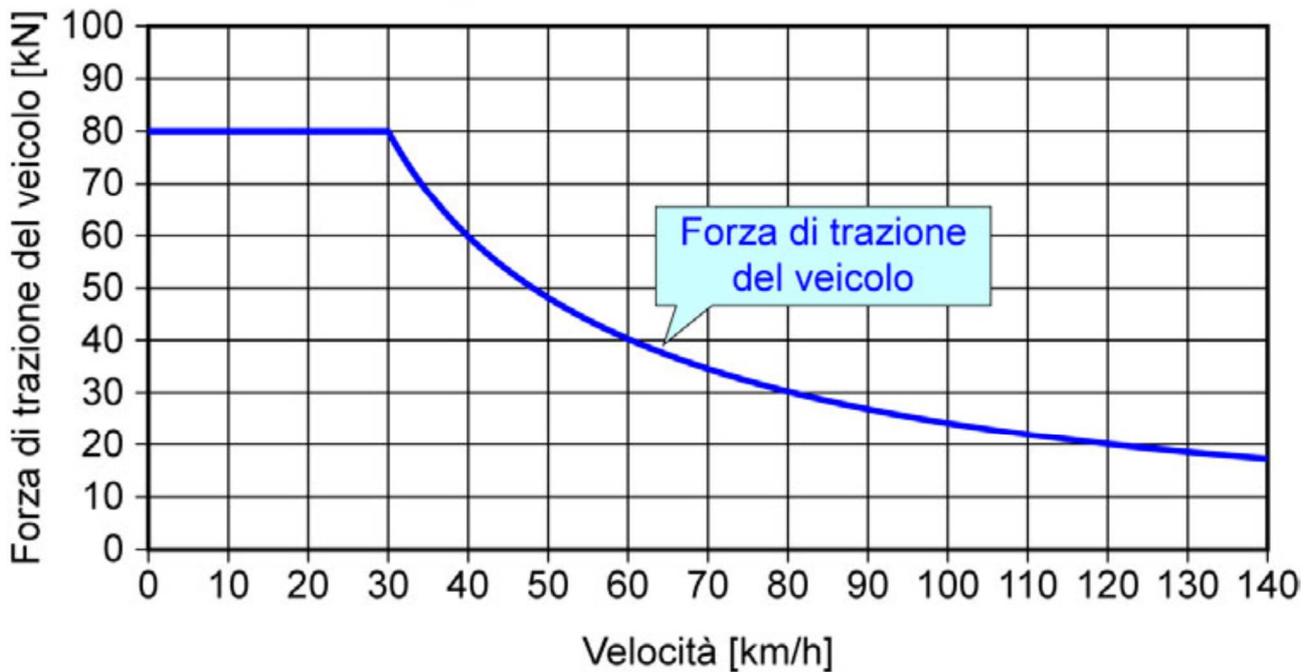


Figura 4.2.8.1.2- Diagramma di andamento della coppia motrice al variare della velocità

Processo di accelerazione, veicolo vuoto (68 t)

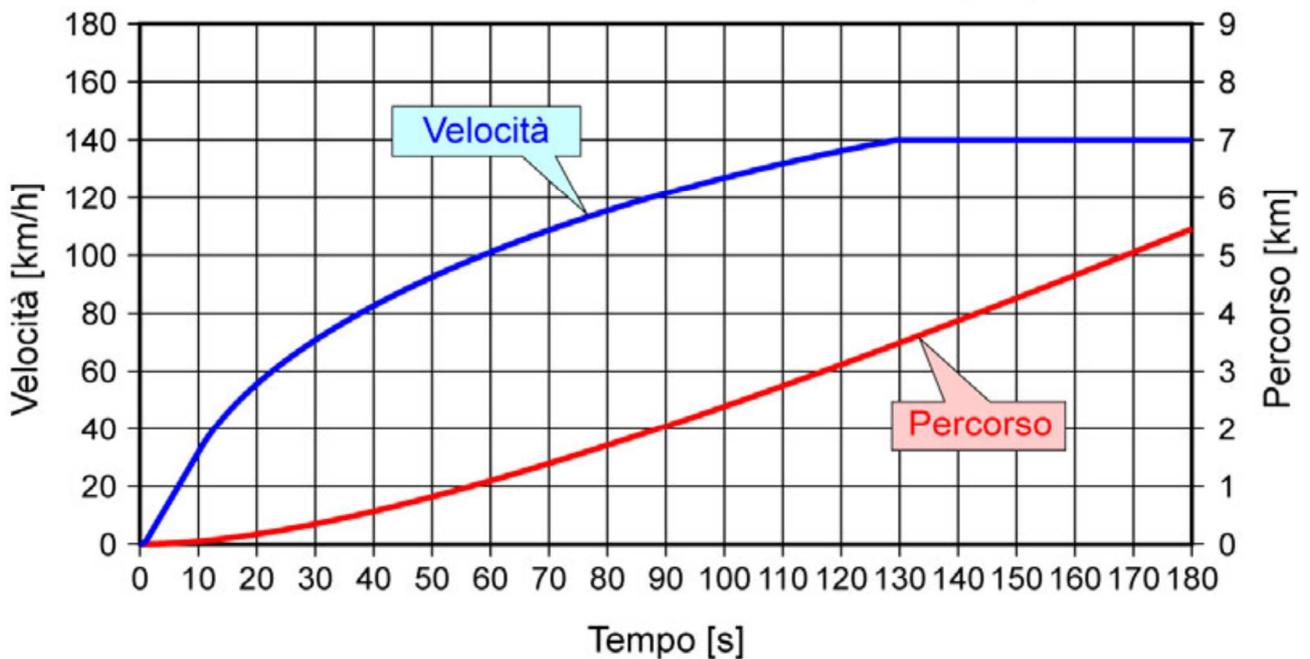


Figura 4.2.8.1.3 - Diagramma di accelerazione (Velocità nel tempo) e di percorrenza (Percorso nel tempo)

I due motori di trazione asincroni molleggiati sono montati trasversalmente alla direzione di marcia e accoppiati alle sale tramite trasmissione a denti frontali. Il gruppo trasmissione consente pertanto di inviare la forza su uno degli assi del carrello motore.

I quattro dischi del freno delle ruote con le pinze del freno e i cilindri del freno a molla frenano il veicolo. Per ogni asse sono montate due pinze del freno, di cui una con un accumulatore di energia a molla.

La sospensione pneumatica compensa le irregolarità e garantisce un viaggio tranquillo per i passeggeri. Inoltre, grazie alla compensazione del livello realizzata in funzione del carico, assicura un'altezza di salita pressoché costante.

Gli sforzi di trazione e frenatura vengono trasmessi attraverso una traversa imbullonata alla cassa e collegata al carrello tramite una lemniscata, due bielle di guida e un perno di ralla. Ciascuna delle due bielle di guida è collegata con un'estremità al telaio del carrello e con l'altra estremità si inserisce nella lemniscata. La lemniscata è imbullonata direttamente al perno fissato alla traversa trasmettendo in questo modo le forze del moto prodotte alla cassa del veicolo.

4.2.8.2 Carrello portante

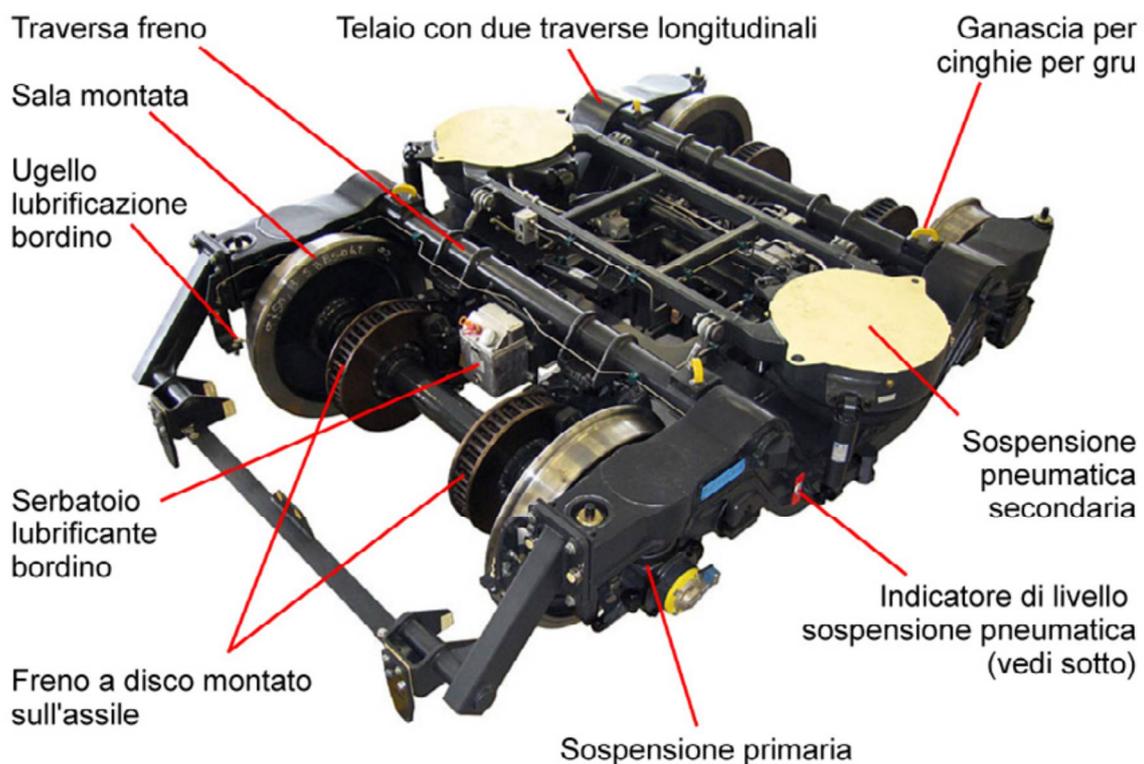


Figura 4.2.8.2.1 – Foto di dettaglio carrello portante di cui vengono equipaggiate le semicasse

Il carrello portante svolge esclusivamente la funzione di sostegno delle semicasse in quanto non presenta alcun elemento motore, ma comprende tutte le apparecchiature necessarie al controllo

della marcia del treno (captatori RSC9 – Ripetizione segnali in cabina a 9 codici), il sistema ungiordo e le piastre frontali atte a deviare eventuali ostacoli sul fungo della rotaia (scacciapietra).

4.2.8.3 Struttura della sospensione primaria

La sospensione primaria, posta tra la sala montata e il telaio del carrello, assume la funzione di guida delle sale montate in direzione longitudinale e trasversale. La sospensione primaria riunisce la bielletta di guida per gli assi, gli ammortizzatori primari e il gruppo della molla elicoidale. Il gruppo della molla elicoidale è formato dal gruppo molla primaria e dai dischi in gomma. All'interno del gruppo della molla elicoidale è montato un respingente ausiliario.

4.2.8.4 Struttura della sospensione secondaria

La sospensione secondaria costituisce l'interfaccia tra il telaio del carrello e la cassa.

È costituita dai seguenti componenti:

- Traversa di sostegno
- Sistema a sospensione pneumatica con molla di emergenza integrata
- Stabilizzatore antirollio
- Respingente trasversale
- Trascinamento longitudinale
- Smorzatori antiserpeggio, ammortizzatori trasversali e ammortizzatori verticali

Le condotte pneumatiche vengono installate sulla traversa. Nelle condotte sono integrate le valvole di regolazione del livello e la valvola di troppopieno della sospensione ad aria. Le valvole di regolazione del livello mantengono le sospensioni pneumatiche alla stessa altezza in condizioni di carico diverse. In caso di danneggiamento della molla pneumatica la valvola di troppopieno acquisisce la funzione di valvola di sicurezza. La valvola di troppopieno si apre quando la pressione dalla molla pneumatica sinistra alla molla pneumatica destra è maggiore di 1,5 bar nel carrello motore e di 0,8 bar nel carrello portante. Ciò consente di evitare l'inclinazione del veicolo.

4.2.8.5 Struttura del telaio del carrello

Il telaio del carrello, dal peso ottimizzato, è composto da una struttura d'acciaio saldata. Tutte le parti di raccordo importanti dal punto di vista funzionale, che influiscono su:

- guida degli assi, trasmissione di forza e aggancio frontale,
- sicurezza e affidabilità degli azionamenti,
- funzionamento perfetto delle unità freni,

Tutte le parti che compongono il carrello sono quindi lavorate meccanicamente entro le tolleranze consentite per garantire ottima ripetibilità del componente nella produzione in serie. Questo modello consente anche una rapida sostituzione di componenti del carrello senza laboriose operazioni di regolazione e adattamento.

4.2.9 Trasmissione dello sforzo di trazione/frenatura

Nel carrello portante la trasmissione della forza avviene tramite una costruzione composta da lemniscata, perno di ralla e braccio longitudinale. Entrambi i bracci longitudinali sono collegati su una estremità con il telaio del carrello, penetrano con la loro altra estremità nella lemniscata. Questa è avvitata direttamente al perno di ralla fissato al pavimento della cassa, e trasmette in questo modo le forze di avanzamento che vengono a crearsi.

Carrello portante
dal basso con:

Trasmissione
longitudinale

Lemniscata

Perno di
ralla del carrello

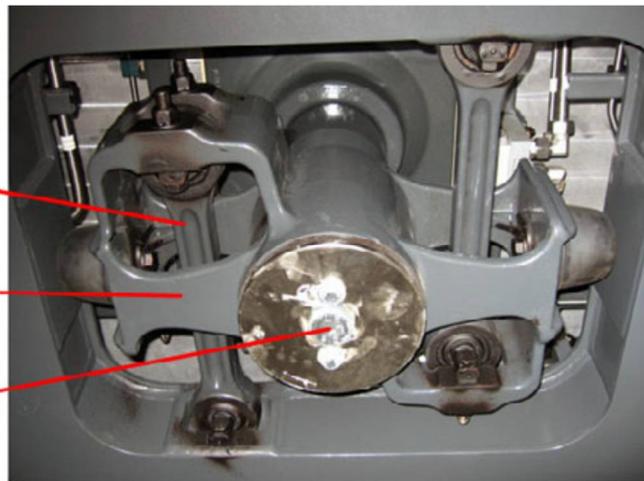


Figura 4.2.9.1 – Sistema a lemniscata per il trascinamento del carrello da parte della cassa e viceversa

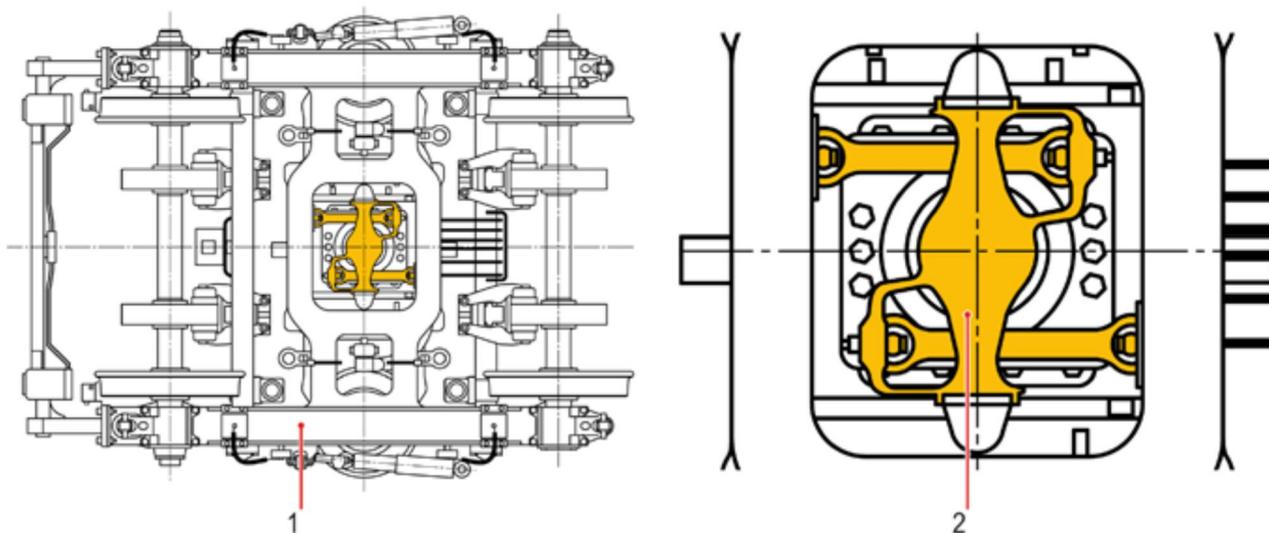


Figura 4.2.9.2 – 1) Carrello portante visto dal basso 2) Dettaglio della lemniscata del carrello portante

Nel caso del modulo motore la trasmissione della forza nel carrello avviene per mezzo di articolazioni montate sul relativo telaio e di aste orizzontali che collegano il carrello alla cassa.

Trasmissione
longitudinale
carrello motore con:

Briglia

Asta di
accoppiamento

Asta longitudinale

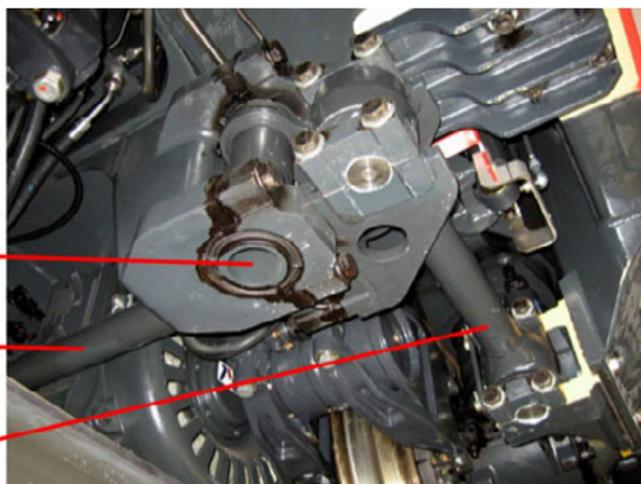


Figura 4.2.9.3 – Sistema di accoppiamento del carrello motore con il modulo di trazione

4.2.10 Struttura degli assi motori

L'asse motore è composto da un semiasse con foro cavo e due ruote monoblocco. Le ruote monoblocco vengono calettate con accoppiamento conico a olio in pressione. I freni a disco vengono avvitati sul traversino della ruota. All'esterno dei corpi di ruota si trovano le boccole di sala, composte ognuna da un'unità a rullo conico. All'interno dei corpi di ruota è montata l'unità motrice, sospesa su molle nel telaio del carrello. Sul semiasse è calettata la stella dell'asse con accoppiamento cilindrico a olio in pressione. La coppia di avviamento viene applicata dal motore sulla stella dell'asse tramite la trasmissione e attraverso l'albero cavo.

4.2.10.1 Configurazione della sospensione del motore di trazione e della trasmissione

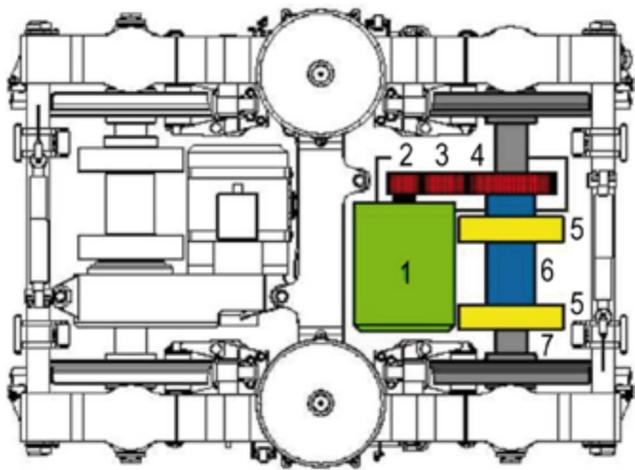


Figura 4.2.10.1.1 – Schema costruttivo collegamento M.E. e sala montata

1	Motore
2	Pignone
3	Corona intermedia
4	Corona grande
5	Giunto con pacchi elastici in gomma
6	Albero cavo
7	Sala montata

In ogni carrello motore l'unità di trazione è composta da due azionamenti ad albero cavo. L'ingranaggio a ruota dentata cilindrica a due stadi e il motore sono sospesi in modo completamente molleggiato nel telaio del carrello. La trasmissione delle forze dal riduttore alla sala montata avviene tramite un albero cavo con innesto a cuneo. L'aria di raffreddamento per i motori di trazione viene aspirata nella zona del tetto e condotta attraverso la parte centrale della cassa mediante canali dell'aria. L'aria di raffreddamento defluisce dal canale dell'aria verso gli azionamenti attraverso una conduzione flessibile. L'ammortizzatore ad aria è necessario affinché l'aria di raffreddamento possa circolare nei motori di trazione in ogni posizione di ammortizzazione.

4.2.11 Trazione

Il carrello motore è equipaggiato con due motori di trazione disposti trasversalmente e a ventilazione forzata che, insieme ai rispettivi ingranaggi a ruota dentata cilindrica, sono montati su molle sul telaio del carrello.

La forza viene trasmessa sull'asse tramite due innesti a cuneo e un albero cavo e, sul binario, tramite le due ruote monoblocco.

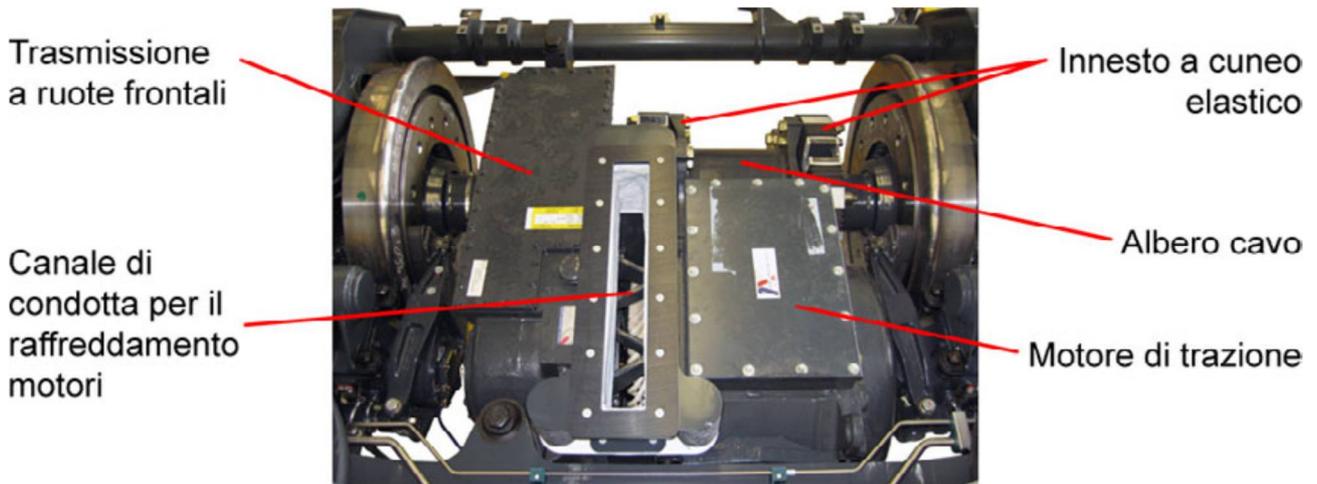


Figura 4.2.11.1 – Vista dall'alto di dettaglio dell'assieme motore sincroni-riduttore a denti dritti-sala montata

4.2.12 Unità di trazione

Il modulo centrale di trazione è munito di due motori Diesel tipo MAN D2876 LE621 con generatrici a corrente continua collegate tramite riduzione meccanica all'albero a gomiti; gli elementi vengono quindi disposti specularmente sui lati destro e sinistro del modulo di trazione al fine di ottimizzare gli spazi, le distribuzioni dei pesi, consentire un rapido accesso per la manutenzione e generare il corridoio di collegamento tra i due vestiboli viaggiatori delle due semicasce collegate ad esso.

I componenti del circuito elettrico principale sono installati nel modulo di trazione o sul

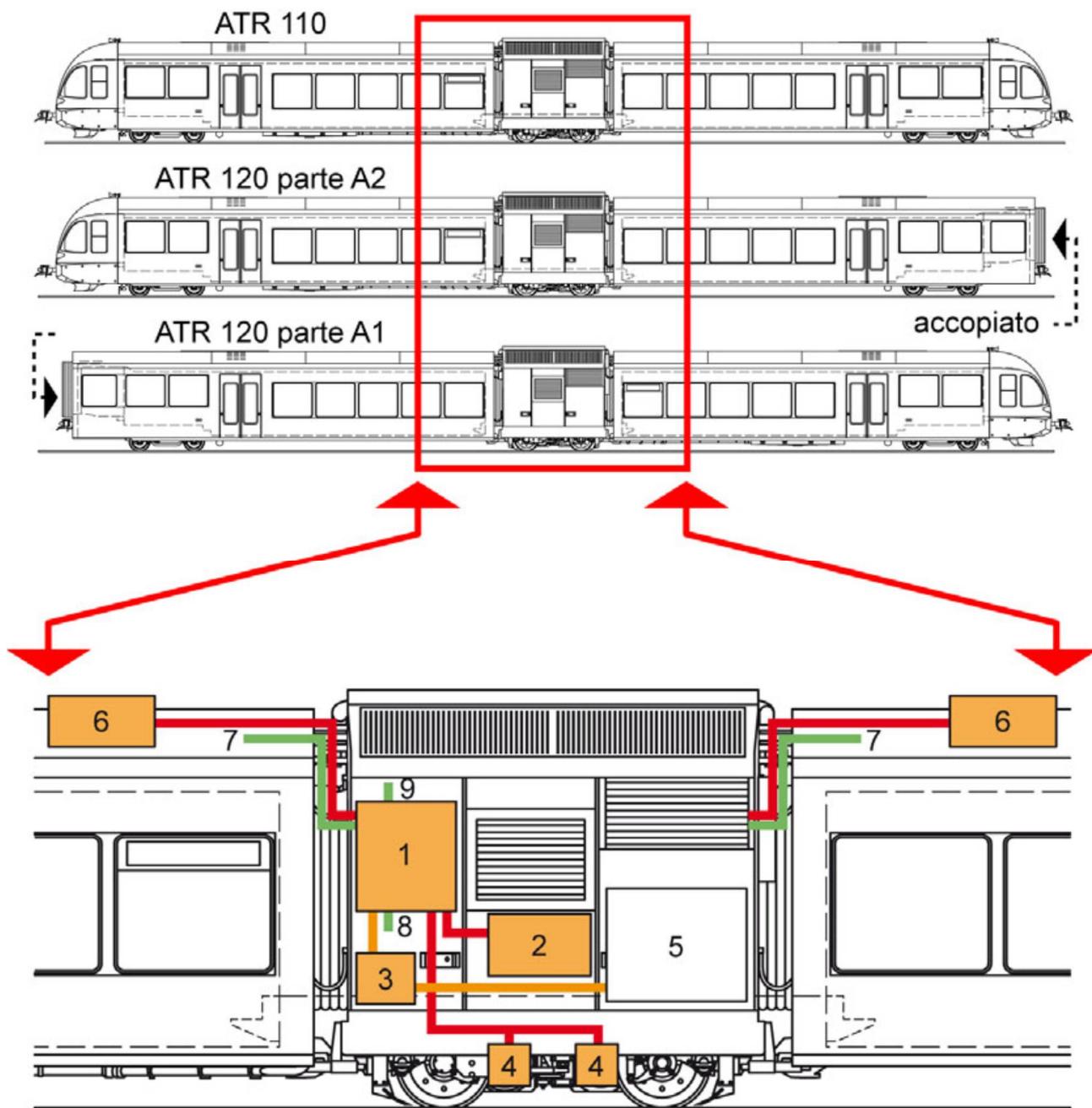


Figura 4.2.12.1 – Schema della disposizione schematica dei componenti necessari alla trazione-frenatura elettrica

Legenda			
1	Inverter principale	5	Motore Diesel
2	Generatore	6	Resistenza di frenatura
3	Batteria 24 V per avviamento Diesel	7	Contro-carichi 400Vac
4	Motore di trazione elettrico asincrono	8	Pompa Diesel 400 Vac
		9	Trasformatore a stella

Cavi Rossi:	1-2, 1-4, 1-6	Conessioni elettriche 750 Vcc (Alta Tensione - AT)
Cavi Verdi:	1-7, 1-8, 1-9	Conessioni elettriche 400 Vac (Media Tensione - MT)
Cavi Arancioni:	1-3, 3-5	Conessioni 24Vcc (Bassa Tensione - BT)

I componenti del circuito elettrico principale sono installati nel modulo di trazione o sul tetto dei vagoni passeggeri, sempre ad una distanza ridotta dal modulo di trazione al fine di ridurre al minimo le perdite energetiche e la generazione di possibili interferenze elettromagnetiche al CAN-Bus di comando/controllo del veicolo.

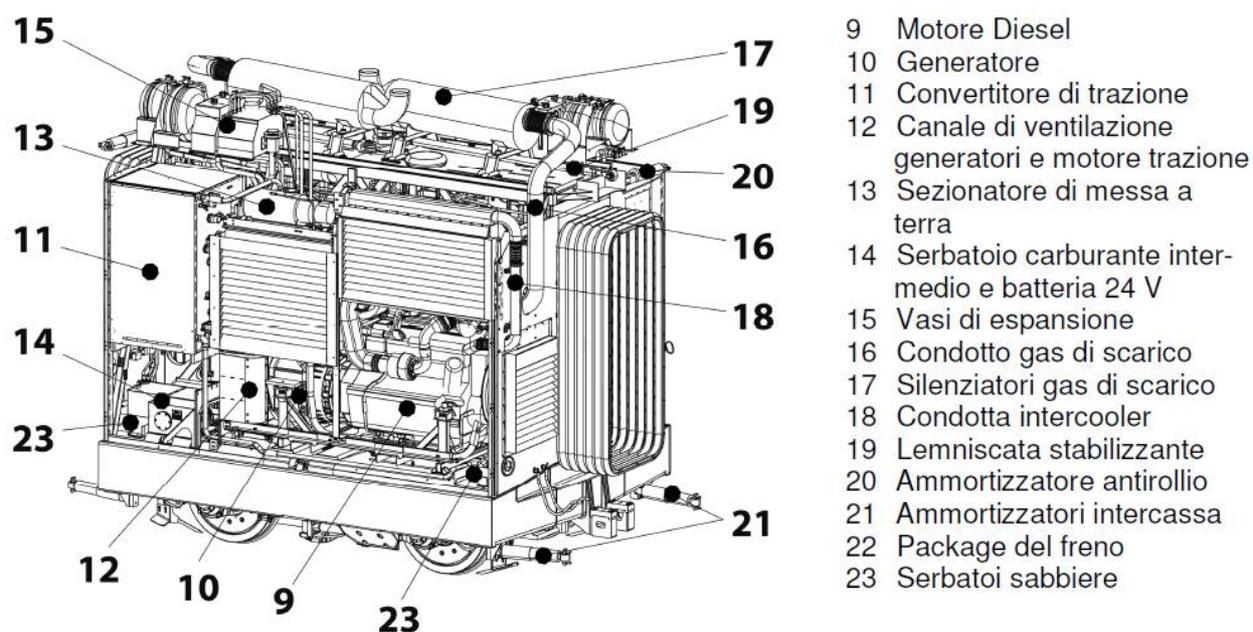


Figura 4.2.12.2 – Vista sulla fiancata sinistra senza elementi di carrozzeria del modulo motore

4.2.13 Impianto di raffreddamento motori diesel

L'impianto di raffreddamento è composto per ogni gruppo di trazione da:

- Scambiatore di calore acqua/aria per il circuito di raffreddamento dei motori diesel
- Scambiatore di calore aria/aria per l'aria di alimentazione
- Scambiatore di calore acqua/aria per il circuito di raffreddamento del gruppo convertitore
- Scambiatore di calore olio/aria per il circuito di raffreddamento olio idraulico

I motori delle ventole del radiatore dell'acqua del motore (1 pezzo) e del radiatore dell'aria di alimentazione (2 pezzi) sono ad azionamento idraulico.

L'avviamento delle ventole dei due gruppi motori Diesel avviene in maniera indipendente a seconda delle esigenze di carico e delle condizioni ambientali.

Entrambi i motori Diesel sono pertanto dotati di pompe idrauliche collegate tramite flange alla cinghia servizi di ciascun motore. Le pompe fanno funzionare i ventilatori dei motori diesel con un regime direttamente proporzionale al numero di giri di lavoro del gruppo termico. Le ventole per il raffreddamento del circuito dell'olio idraulico e del convertitore sono invece fissate direttamente al motore Diesel tramite una frizione tipo Centaflex attivata anch'essa automaticamente dal sistema quando necessario: in questo modo si migliorano di molto le tempistiche di warm-up delle unità termiche al fine di ridurre nel tempo usure e danni per il non corretto adeguamento delle temperature di regime.

4.2.14 Motore Diesel – Generatrice elettrica

I motori a sei cilindri sono provvisti di una iniezione diretta Common-Rail. L'aria di combustione viene compressa con un turbocompressore e condotta ai motori attraverso un raffreddamento ad aria.

Il serbatoio del carburante si trova sotto la cassa B e ha un volume di 1.500 litri. Il carburante arriva ai motori attraverso un serbatoio intermedio posto nel modulo di trazione richiamato da una specifica pompa gasolio azionabile manualmente dal macchinista in caso di guasto.

Come anticipato, il calore dei motori è regolato da un complesso impianto di raffreddamento costituito da radiatori distinti per ciascuna unità di potenza; quando è attivo il riscaldamento, il calore generato dal motore termico viene deviato al sistema secondario dell'acqua di riscaldamento attraverso scambiatori di calore per una maggior efficienza di esercizio e riduzione dei consumi.

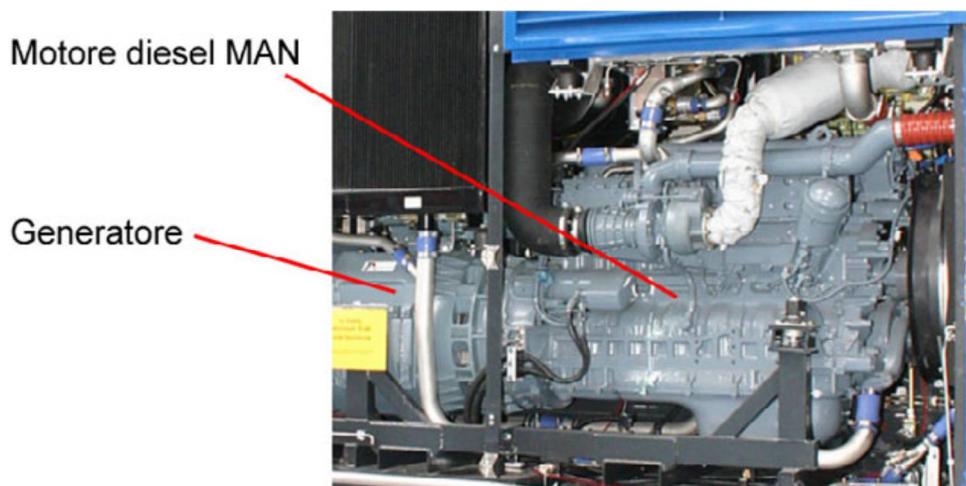


Figura 4.2.14.1 - Foto complessiva del motore diesel MAN

Ciascun generatore è accoppiato con flange di riduzione al motore Diesel e costituisce un'unità compatta con quest'ultimo.

Il generatore utilizzato è una macchina asincrona a corrente trifase quadripolare con ventilazione forzata a corrente d'aria, realizzato nella classe di isolamento C 200.

La potenza nominale per ciascun un generatore è di 400 kW sufficiente a garantire il funzionamento in trazione e frenatura elettrica del motore cui asserva oltre che a tutti gli ausiliari del rotabile: in caso di guasto ad una generatrice o motore diesel, il treno può proseguire il servizio con la sola variazione della percentuale di massa frenata al quale vanno applicate opportune regole di circolazione indotte dal gestore dell'infrastruttura (limiti di velocità a seconda della linea percorsa). Il sistema elettrico è pertanto ridondato per avere una maggior disponibilità.

Lo statore della generatrice è di tipo ad innesto a pressione nella carcassa del generatore, in questo modo si riducono le vibrazioni complessive riducendo al minimo le dilatazioni termiche che potrebbero compromettere il regolare funzionamento del rotore.

L'avvolgimento statorico è composto da rame profilato isolato con kapton mentre le testate di bobina sono autoportanti.

Il rotore in corto circuito è munito di supporto su un lato mentre, come anticipato in precedenza, la seconda estremità dell'albero rotorico poggia sull'albero a gomiti del motore Diesel. L'avvolgimento rotorico è costituito da barre elettrolitiche in rame con anelli di corto circuito saldati ed anelli calettati al fine di evitare possibili danni causati da un numero di giri superiori a quello nominale (rotore in fuga).

L'unico elemento del generatore soggetto a usura è pertanto il supporto del rotore che deve essere sostituito, ai fini della sicurezza di esercizio e della macchina, dopo una percorrenza di circa 3 milioni di km (percorrenza raggiunta in circa 3 anni di esercizio).

4.2.14.1 Funzionamento del motore diesel

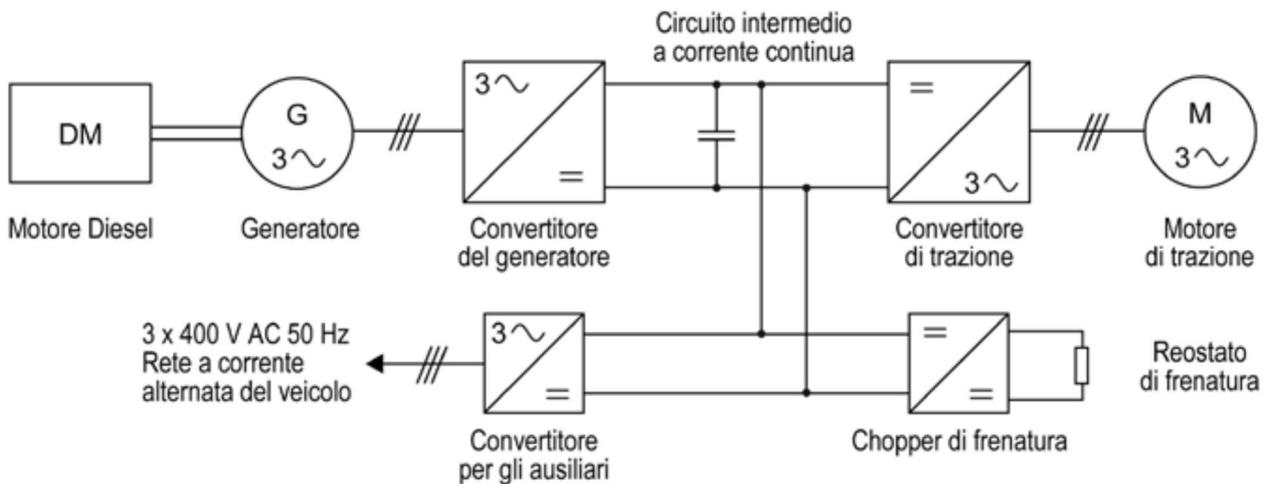


Figura 4.2.14.1.1 – GTW schema energia e trazione

I motori MAN impiegati sono del tipo D2876 LE 124. Si tratta di un motore diesel raffreddato ad acqua con sei cilindri in linea e sistema di iniezione Common-Rail in abbinamento al sistema di gestione elettronico EDC 7 (Electronic Diesel Control).

I motori diesel a 4 tempi sono sovralimentati mediante una turbina per la compressione dei gas di scarico, con raffreddamento dell'aria di sovralimentazione. Il motore diesel è conforme al livello di emissione IIIA della direttiva europea per l'abbattimento delle emissioni.

Come nel caso dei motori per camino, il blocco cilindri è sistemato in verticale permettendo in questo modo una luce di passaggio massima nell'intercomunicante del modulo di trazione.

I motori diesel sono gestiti tramite una rete CAN Bus conforme allo standard SAE J1939 che garantisce la comunicazione tra la logica di veicolo e il sistema di controllo del motore, inclusa la trasmissione dei valori di processo e diagnostici attuali. Le operazioni di manutenzione e regolazione possono essere effettuate mediante appositi sportelli di servizio.

Le sale macchine sono fonoisolate contro le emissioni acustiche.

Attraverso il preriscaldamento dell'acqua di raffreddamento è possibile un avviamento a freddo fino a una temperatura di $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$. Senza preriscaldamento è possibile un avviamento a partire da una temperatura di $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$.

L'aria di combustione viene aspirata nella parte superiore delle pareti laterali e depurata tramite filtri a secco. L'impianto di scarico è installato sul tetto del modulo di trazione. L'unità "propulsore termico-generatore" e l'impianto di raffreddamento del motore diesel sono montati su un telaio. L'unità può essere rimossa e rimontata mediante un carrello elevatore.

4.2.14.2 Sistema Common Rail

Il sistema di iniezione "Common-Rail" assicura un consumo di carburante minimo, una pronta reazione e un comportamento dinamico con basse emissioni acustiche. Il sistema "Common-Rail" consente una rapida iniezione e nebulizzazione del carburante riducendo in questo modo sia i rumori della combustione sia le emissioni.

Nell'impianto di raffreddamento avviene la riduzione dei monossidi di azoto presenti nei gas di scarico. In questo modo si hanno dei contenuti di monossido di azoto, monossido di carbonio, idrocarburo e particelle di fuliggine in percentuali inferiori ai limiti prescritti dalla Commissione Europea.

Nel sistema di iniezione "Common-Rail" la generazione della pressione è disaccoppiata dal sistema di iniezione. La pressione di iniezione viene generata indipendentemente dal regime motore e la quantità di carburante da iniettare tramite una pompa ad alta pressione con pompa di pescaggio collegata (fino a 1.600 bar) e messa a disposizione degli iniettori all'interno del collettore ad alta pressione. La quantità di carburante inviata da parte della pompa ad alta pressione viene regolata da una valvola proporzionale. Il momento dell'iniezione e la quantità di carburante da iniettare sono calcolati all'interno di una centralina elettronica e realizzati mediante iniettori gestiti tramite elettrovalvole). Utilizzando iniettori gestiti mediante elettrovalvole si possono realizzare delle iniezioni multiple; la pre-iniezione serve a migliorare la combustione, a ridurre i rumori della combustione e i picchi di pressione che si verificano durante la stessa. Con l'iniezione principale viene immessa l'energia per il lavoro svolto dal motore. Il controllo e la gestione del sistema avvengono mediante sensori. Il carburante viene filtrato mediante la Centralina di Servizio Carburante (KSC).

4.2.14.3 Iniettori

Gli iniettori vengono gestiti tramite elettrovalvole e sono collocati in posizione verticale all'interno della testa cilindri e fissati all'interno della stessa con un'apposita staffa.

4.2.14.4 Lubrificazione motore

Il sistema di lubrificazione è del tipo a circolazione forzata che provvede alla lubrificazione di tutti i supporti di banco. Il filtro dell'olio motore e il radiatore dell'olio sono integrati in un modulo olio ubicato sul lato destro del motore. La misurazione del livello dell'olio all'interno della coppa dell'olio avviene sul lato sinistro del motore per mezzo di un'asta di controllo oppure mediante un sensore di livello nel giogo del basamento motore.

4.2.14.5 Impianto di raffreddamento

Il sistema di raffreddamento è del tipo a circolazione forzata regolata a termostato con una pompa del refrigerante azionata direttamente dall'albero motore che non richiede manutenzione. Un carter intermedio consente di alloggiare la pompa del refrigerante e i termostati. Sul carter intermedio è anche previsto l'attacco per il circuito di mandata del sistema di riscaldamento. I termostati consistono di inserti sostituibili con elementi in cera come materiale dilatante. Su tutti i motori diesel vengono impiegate ventole con giunto viscoso comandate elettricamente. La ventola con giunto viscoso viene attivata in funzione della temperatura del liquido refrigerante e del segnale proveniente dall'apparato di controllo del veicolo. La ventola non necessita di manutenzione ed è azionata dall'albero a camme mediante una ruota cilindrica a denti elicoidali.

Oltre al circuito di raffreddamento dei motori diesel sopra illustrato, nel modulo di trazione sono presenti i seguenti sistemi di raffreddamento:

- Scambiatore di calore aria/aria per l'aria di alimentazione
- Scambiatore di calore acqua/aria per il circuito di raffreddamento del gruppo convertitore
- Scambiatore di calore olio/aria per il circuito di raffreddamento olio idraulico

I motori delle ventole del radiatore dell'acqua del motore e del radiatore dell'aria di alimentazione sono ad azionamento idraulico. L'inserimento delle ventole dei due gruppi motori diesel avviene in maniera indipendente. Entrambi i motori Diesel sono dotati di pompe idrauliche collegate tramite flange che alimentano i ventilatori dei rispettivi motori Diesel. Le ventole per il raffreddamento del circuito dell'olio idraulico e del convertitore di corrente sono fissate direttamente al motore Diesel.

4.2.14.6 Impianto di rifornimento

L'impianto del carburante è costituito da un serbatoio principale (1'350 l) e un serbatoio supplementare (80 l). Il serbatoio principale si trova sotto la semicassa. Il carburante arriva ai motori attraverso un serbatoio intermedio posto nel modulo di trazione. Il bocchettone di riempimento per il riempimento del serbatoio si trova tra il modulo di trazione e la cassa, sul lato destro e sul lato sinistro.

4.2.14.7 Potenza motore Diesel

La seguente figura contiene il diagramma di potenza, coppia e consumi in relazione al numero di giri. Il motore diesel deve essere registrato in base ai diagrammi di potenza.

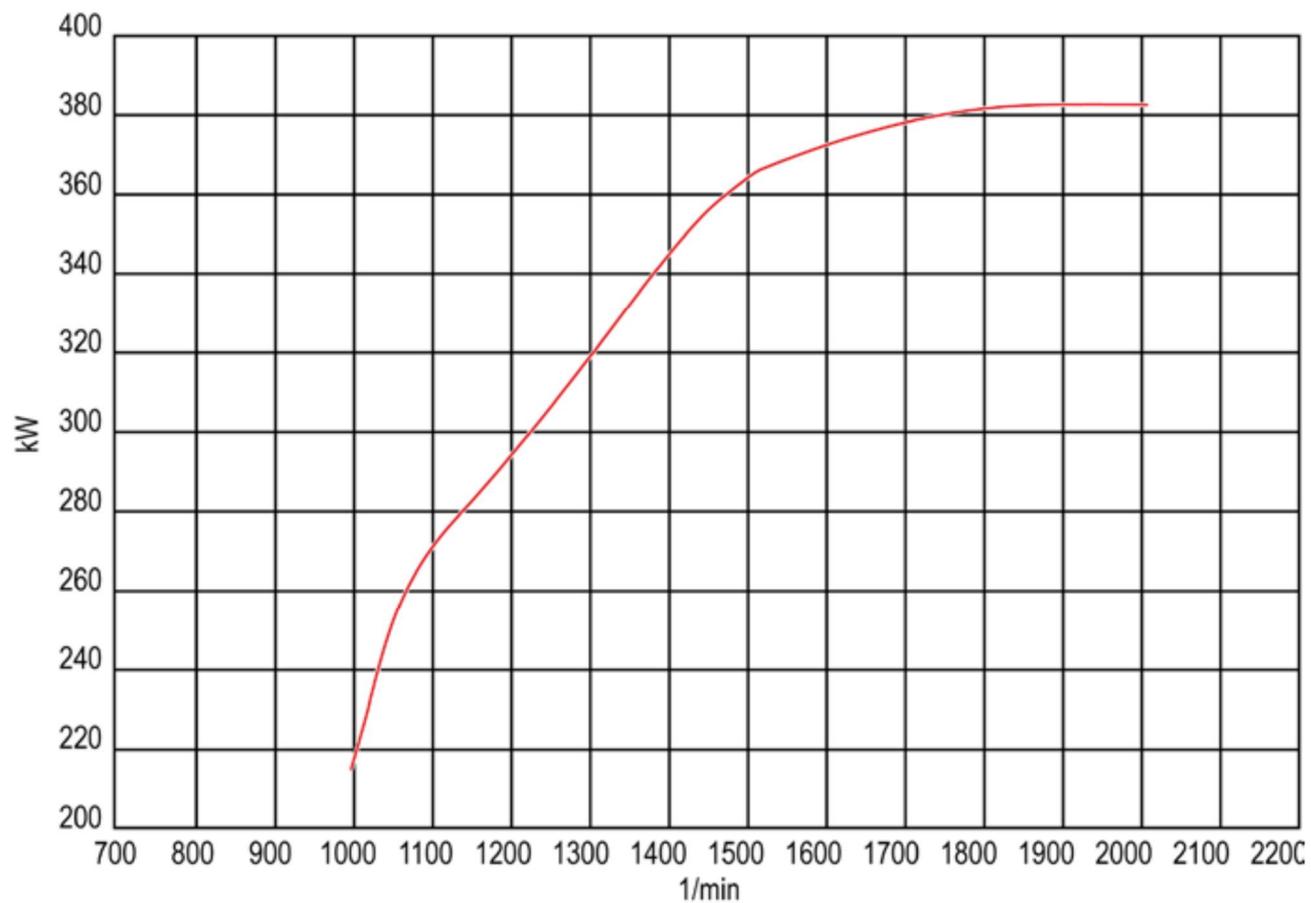


Figura 4.2.14.7.1 – Diagramma potenza vs. numero giri

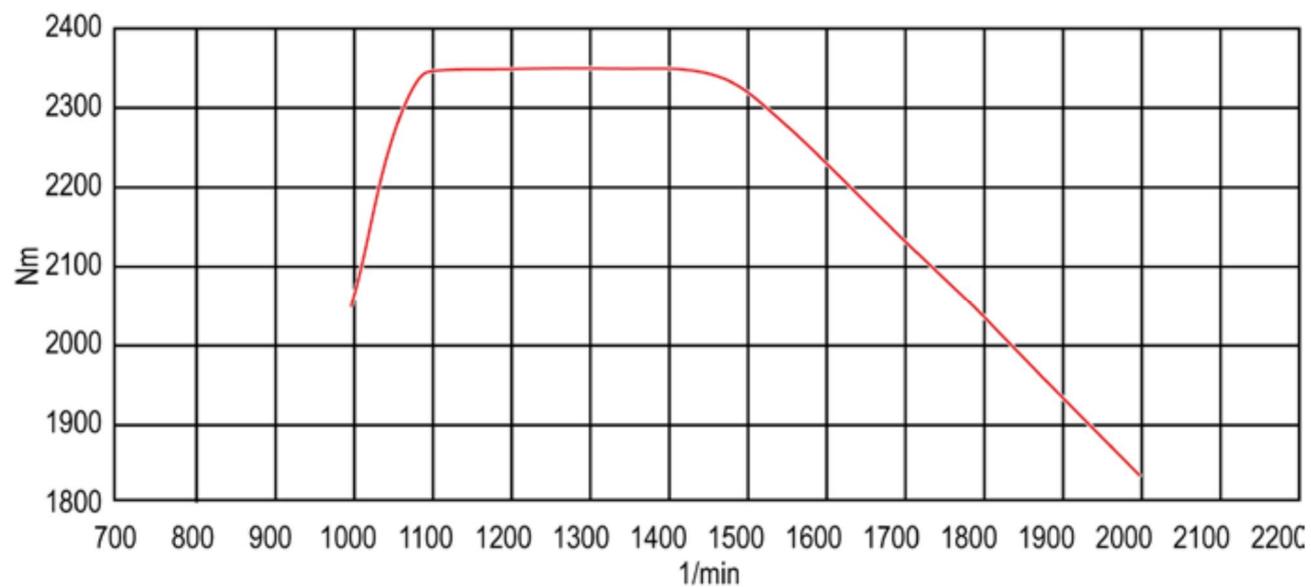


Figura 4.2.14.7.2 – Diagramma coppia vs. numero giri

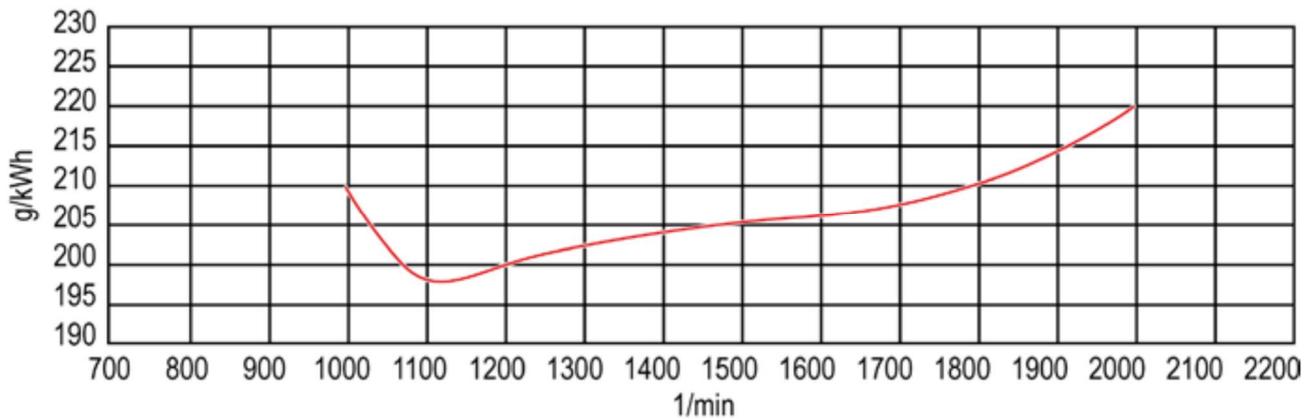


Figura 4.2.14.7.3 – Diagramma consumi vs. numero giri

4.2.15 Convertitore di trazione

Il convertitore di trazione è composto da convertitori/raddrizzatori di tipo ad impulsi alternati IGBT per il generatore, per il motore di trazione, per il freno reostatico e per gli ausiliari. Con la tecnologia IGBT si utilizzano componenti di potenza moderni, con basse perdite di contatto. L'azionatore dei freni è composto dagli stessi elementi. Il convertitore di trazione e gli altri componenti ad alta tensione, come il condensatore di circuito intermedio ed il convertitore, nonché gli aeratori sono collocati in un'unico armadio. In questo armadio è sistemato anche il convertitore di frequenza della rete di bordo, il quale preleva l'energia per i servizi elettrici ausiliari dal circuito intermedio a tensione continua.

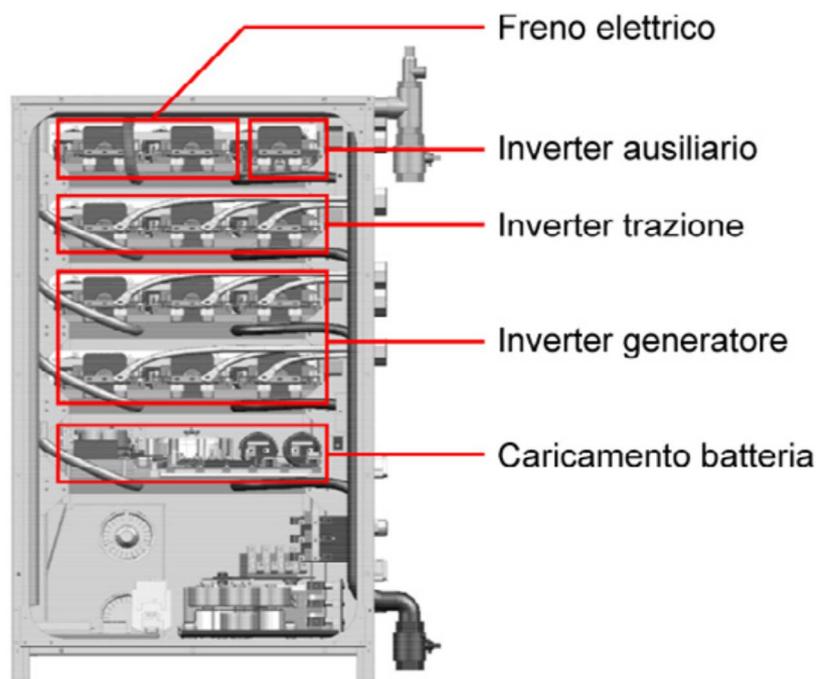


Figura 4.2.15.1 – Armadio convertitore per il controllo dei motori elettrici e degli ausiliari (Convertitore ABB CC500)

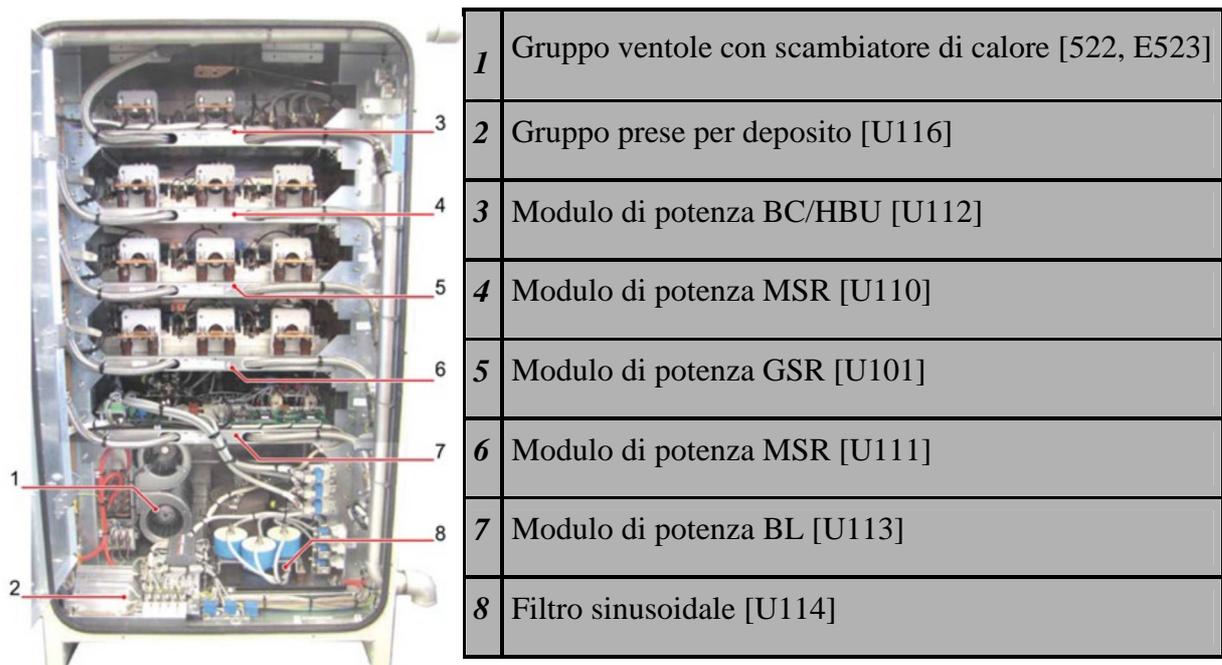


Figura 4.2.15.2 – Moduli di potenza ed elementi di raffreddamento del convertitore

4.2.15.1 Configurazione dei moduli di potenza

Tutti i semiconduttori di potenza e i relativi elementi passivi sono raggruppati all'interno di moduli, i cosiddetti Power Electronic Building Blocks (PEBB).

Nel convertitore di corrente sono installati complessivamente cinque moduli di potenza (IGBT) di cui tre sono identici.

- PowerPak 3-3 per convertitore di corrente generatore [U101] e convertitore di corrente motore [U110] e [U111]
- PowerPak 3-5 per chopper di frenata / convertitore servizi ausiliari [U112]
- PowerPak-BL [U113] per l'alimentazione della rete di bordo a corrente continua nonché per la ricarica delle batterie; a differenza degli altri moduli di potenza il PowerPak-BL comprende una separazione galvanica.

4.2.15.2 Funzionamento del convertitore di corrente motore

Il convertitore di corrente dei motori funziona con una frequenza di base costante in PWM e copre l'intero campo di frequenza del motore (da ca. 1 a 170 Hz).

Il convertitore di corrente permette le seguenti modalità di funzionamento dei motori di trazione:

- Marcia (avanti / indietro):

Il convertitore di corrente dei motori converte la tensione di 750 V del circuito intermedio in una tensione trifase e aziona il motore.

- Frenatura (avanti / indietro):

Il motore funziona da generatore e agisce in questo modo come freno elettrico.

Il convertitore di corrente dei motori converte la tensione trifase generata dal motore nella tensione di 750 V del circuito intermedio. In modalità di frenatura, la tensione del circuito intermedio viene convogliata dal controllo del convertitore agli apparati ausiliari, al generatore asincrono ed alle resistenze di frenatura.

4.2.15.3 Funzionamento del convertitore di corrente generatore

Il convertitore di corrente generatore converte la tensione trifase generata dal motore diesel attraverso il generatore nella tensione di 750 V del circuito intermedio.

Il generatore è accoppiato al motore diesel. Per questo motivo la frequenza della portante principale del convertitore di corrente generatore, a seconda della potenza del motore diesel, varia da 20 Hz (regime minimo) a 65 Hz (regime massimo del motore diesel).

4.2.16 Motori di trazione

Nel carrello motore di ogni motrice sono installati due motori di trazione asincroni quadripolari a ventilazione forzata la cui potenza continua è da 400 kW ed il cui funzionamento in trazione o frenatura elettrica viene comandato dal convertitore di trazione.



Figura 4.2.16.1 – Motore elettrico asincrono e relativa asse motrice

All'interno dello statore del motore elettrico vengono alloggiati delle sonde di temperatura in grado di misurare la temperatura dello stesso. Tale misura viene inviata tramite rete CAN-Bus al sistema diagnostico del veicolo che può essere richiamato dal macchinista o dal personale di officina tramite display MMI (Machine-Man-Interface), o tramite software dedicato in appositi Pc dei manutentori, per controllare il riscaldamento del motore elettrico. Nell'unità logica del gruppo di trazione si ha invece che il segnale di temperatura consente il regolamento della stessa andando a comandare la ventilazione forzata necessaria.

4.2.16.1 Struttura del motore di trazione

Il motore di trazione forma assieme all'accoppiamento a membrana, al riduttore e all'innesto a cuneo l'unità di trazione. In ciascun carrello motore sono montate due unità di trazione identiche.

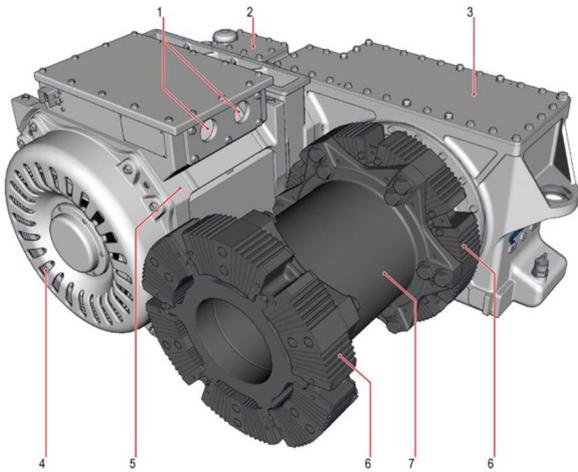


Figura 4.2.16.1.1 – Unità operatore

1	Collegamenti per cavo motore di trazione
2	Accoppiamento a membrana
3	Riduttore
4	Fuoriuscita aria
5	Motore di trazione
6	Innesto a cuneo
7	Albero cavo

4.2.16.2 Funzionamento motore di trazione

Durante il funzionamento, il motore di trazione commuta l'energia elettrica in energia meccanica e aziona il veicolo. In modalità di funzionamento a generatore, il motore di trazione trasforma l'energia di frenatura meccanica in energia elettrica e la reimmette, tramite i convertitori di corrente e i trasformatori, in rete (recupero energia). Le sonde di temperatura controllano il riscaldamento del motore e comandano la ventilazione necessaria. Il comando di un motore di trazione avviene tramite i rispettivi convertitori di corrente. Un trasmettitore dell'asse posto sull'estremità della sala montata rileva le informazioni di velocità necessarie.

4.2.16.3 Trasmissione

La trasmissione commuta velocità e coppia di trazione dal motore di trazione all'innesto a cuneo. Si riduce la velocità di rotazione e contemporaneamente si aumenta la coppia di trazione di circa lo stesso fattore.

4.2.16.4 Innesto a cuneo

Gli innesti a cuneo trasmettono i movimenti di rotazione in modo elastico-rotatorio alle coppie di ruote. Grazie ai cunei flessibili negli spazi intermedi le coppie di trazione e frenatura vengono trasmesse in modo ammortizzato. In questo modo il riduttore totale è salvo da movimenti improvvisi.

4.2.16.5 Funzionamento del chopper di frenatura

Il chopper di frenatura assolve i seguenti compiti:

- Trasmissione dell'energia eccessiva alle resistenze durante la frenatura:

Durante la frenatura, i motori di trazione vengono utilizzati come freno elettrico. Durante la frenatura viene prodotta della corrente che viene immessa nel circuito intermedio. Il regolatore di tensione che mantiene costante la tensione del circuito intermedio attiva, in caso di necessità, il chopper di frenata che a sua volta trasmette l'energia alle resistenze di frenatura (reostato posto sull'imperiale delle semicasse).

Il pilotaggio si basa su un bilancio di potenza in tempo reale per evitare l'attivazione del chopper di frenata quando il generatore sta ancora fornendo energia.

- Limitazione della tensione del circuito intermedio in caso di fenomeni transienti e situazioni di guasto.

In questo caso, il duty cycle dipende dalla tensione del circuito intermedio. Il chopper di frenata lavora con una frequenza di base di 2 kHz ed è costituito da due rami di fase separati. Ogni ramo di fase è collegato al polo negativo del circuito intermedio attraverso una resistenza di frenatura collocata esternamente. I due rami di fase vengono comandati in controfase per ridurre al minimo le sovrapposizioni della corrente continua e quella alternata all'interno del circuito intermedio.

4.2.17 Equipaggiamenti ausiliari 400 Vcc

In ogni convertitore è integrato un inverter per l'equipaggiamento ausiliario, il quale viene alimentato a partire dal rispettivo circuito intermedio.

Tutte le utenze ad alto assorbimento, quali impianto di climatizzazione, ventilatori e alcuni elementi riscaldanti elettrici, sono alimentati da una rete di bordo a corrente trifase a 400 volt / 50 Hertz. Tutte le altre utenze sono alimentate dalla rete a batteria a 24 V. Il caricamento della batteria avviene in un caricabatteria integrato nell'inverter per l'equipaggiamento ausiliario.

In caso di guasto di un inverter, l'alimentazione dell'intera rete degli equipaggiamenti ausiliari è garantita dai restanti inverter, con una riduzione della potenza della climatizzazione nei compartimenti passeggeri.

Il caricamento della batteria avviene tramite caricabatteria integrati nei due convertitori.

4.2.18 Sistema di controllo

Il sistema di controllo della logica di veicolo ha una struttura parzialmente ridondante. Il comando multiplo avviene tramite uno dei due bus di treno posati in parallelo.

In caso di indisponibilità di un bus di treno, continua ad essere assicurata la piena disponibilità del sistema di controllo del veicolo.

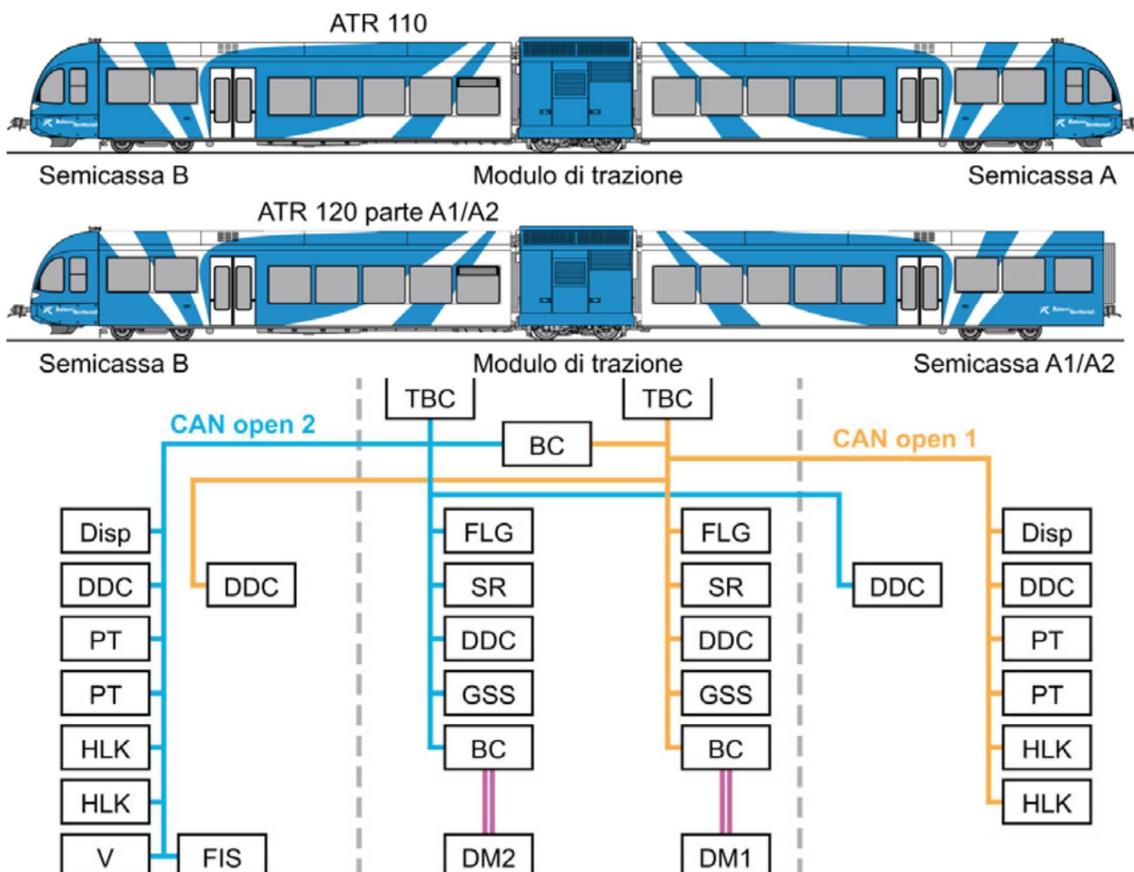


Figura 4.2.18.1 – Schema logico della rete di bordo CAN-Bus a 2 livelli di ridondanza ATR 110/120

Legenda			
BC	Accoppiatore Bus	GSS	Antislittante
DDC	Nodo Bus remoto	HLK	Impianto di climatizzazione
Disp	Display diagnostico (MMI)	PT	Porte di accesso
DM	Motore Diesel	SR	Convertitore
FIS	Sistema di informazione passeggeri	TBC	Accoppiatore Bus di treno
FLG	Apparato di controllo veicolo	V	Indicatore di velocità (canale odometrico)

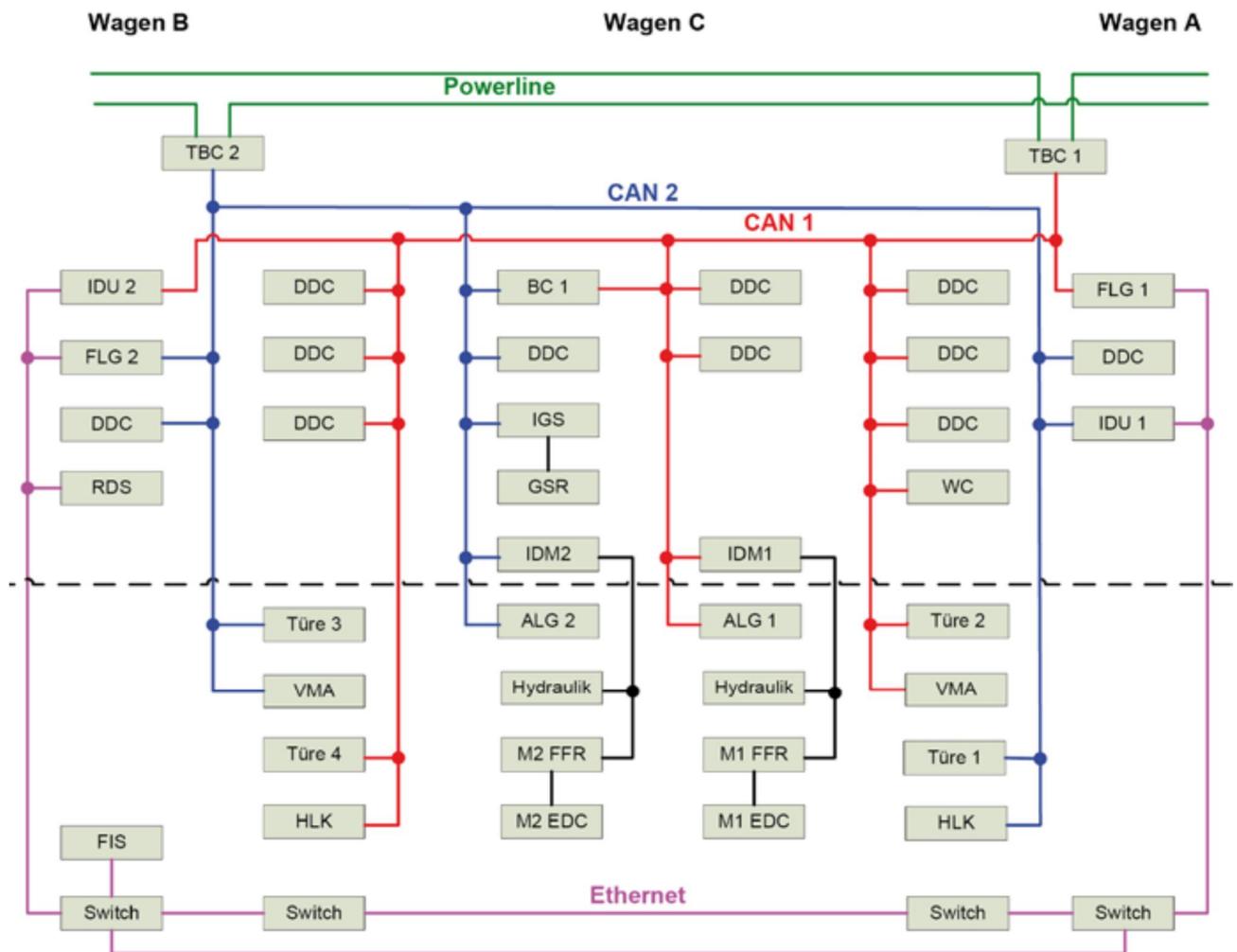


Figura 4.2.18.23 - Schema logico della rete di bordo CAN-Bus a 2 livelli di ridondanza ATR 116/126

Sigla	Descrizione
ALG	Apparecchiatura di controllo del convertitore di trazione per il convertitore di corrente
BC	Accoppiatore Bus
DDC	Nodo bus decentrale
FIS	Sistema di informazione ai passeggeri
FLG	Apparato di controllo del veicolo
GSR	Calcolatore del dispositivo antipattinamento
HLK	Climatizzatore
Idr	Trasmissione idraulica per raffreddamento motore diesel
IDM	Interfaccia motore Diesel
IDU	Intelligent Display Unit (monitor diagnostico)
IGS	Interfaccia calcolatore del dispositivo antipattinamento
EDC	Dispositivo di controllo motore diesel (Electronic Diesel Control)
FFR	Dispositivo di controllo motore diesel (computer di gestione del veicolo)
PT	Porte di accesso
RDS	Rail Data Service
TBC	Accoppiatore bus di treno
VMA	Impianto tachimetrico (Teloc)
WC	Ritirata

4.2.19 Gruppo generazione aria

Il compressore montato sul tetto delle carrozze (semicasse A, A1, A2) con essiccazione dell'aria in due camere fornisce l'aria compressa alle utenze pneumatiche.

L'aria compressa viene disidratata nell'essiccatore a due camere, affinché l'intero impianto pneumatico possa lavorare il più possibile senza manutenzione e in assenza di anomalie.

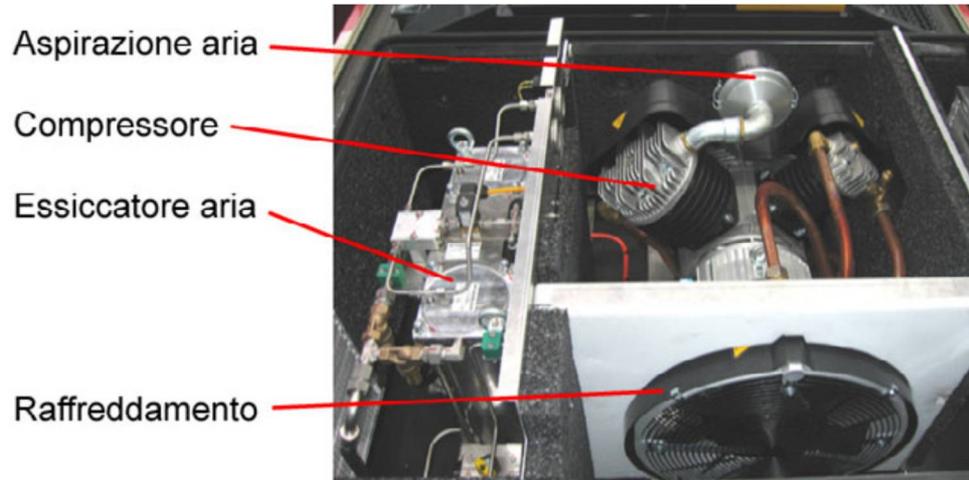


Figura 4.2.19.1 – Visione di insieme del gruppo compressore e specifico raffreddamento/essiccatore

Tramite i serbatoi principali dell'aria vengono alimentati i sistemi seguenti:

- Impianto frenante
- Sospensione pneumatica nei carrelli
- Sabbiere
- Impianto WC
- Tromba
- Ungibordi
- Specchio retrovisore (sui veicoli predisposti)
- Porte: porte d'accesso e porte intercomunicanti nel automotrice
- Sedile del conducente

Le valvole di esclusione dei serbatoi principali dell'aria sono comandate elettricamente. Vengono aperte inserendo l'interruttore di messa in funzione, mentre vengono chiuse disinserendo lo stesso: in questo modo si garantisce la tenuta delle capacità per un periodo più lungo quando si predispongono il veicolo per la sosta prolungata.

4.2.19.1 Montaggio impianto pneumatico

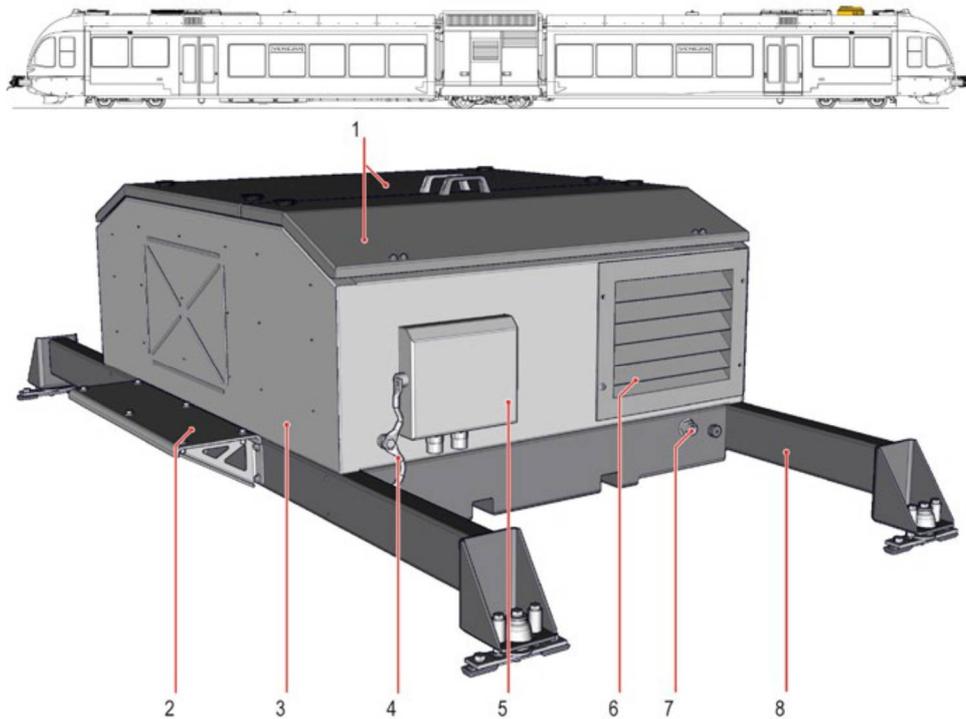


Figura 4.2.19.1.1 - Luoghi di montaggio e struttura dei gruppi di produzione e trattamento aria

Sigla	Descrizione
1	Coperchio del vano compressore
2	Lamiera gradino
3	Alloggiamento del compressore con compressore e impianto di essiccazione dell'aria
4	Cavetto di messa a terra
5	Copertura corrente principale e di comando
6	Presa d'aria
7	Raccordo condotta principale
8	Struttura portante del compressore con ammortizzatore

Il veicolo è dotato di un gruppo di produzione e trattamento aria installato sul tetto della semicassa A. Questo gruppo dispone di un compressore e di un impianto di essiccazione dell'aria. È montato all'interno di un alloggiamento del compressore con silenziatore su una struttura portante ammortizzata contro le vibrazioni.

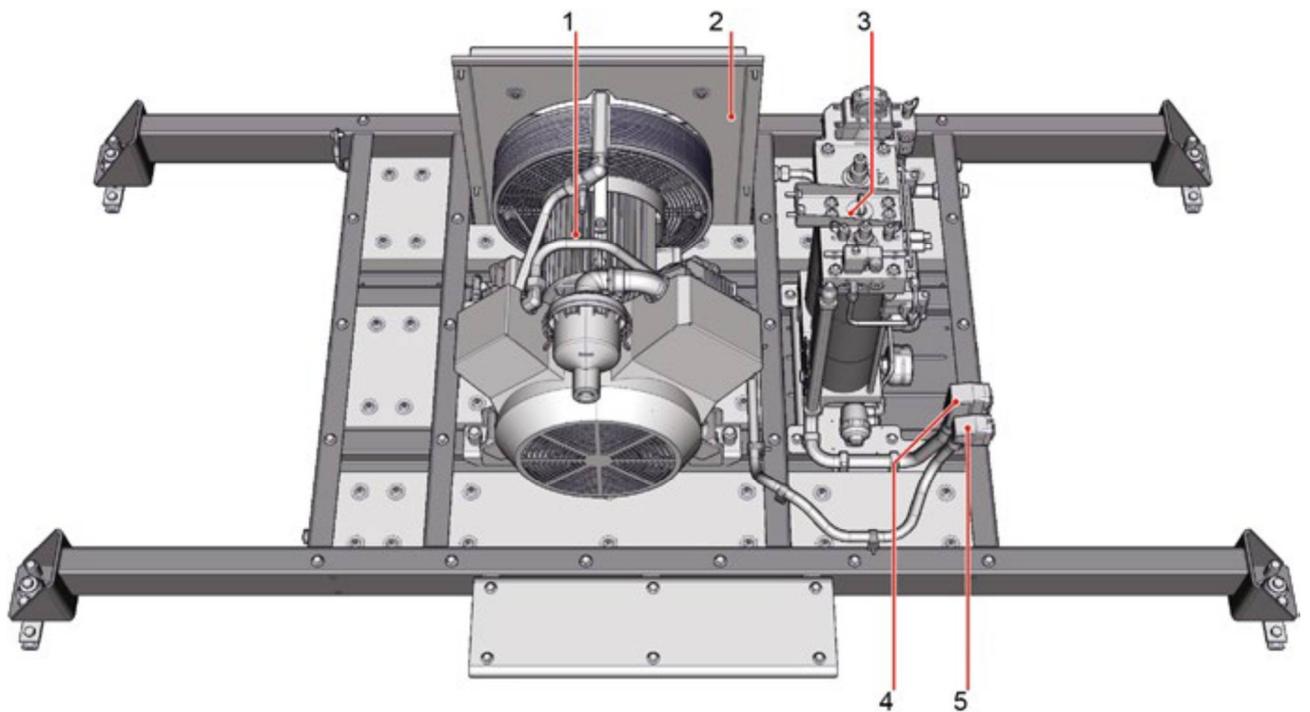


Figura 4.2.19.1.2 - Dettagli del gruppo di produzione e trattamento aria

<i>Sigla</i>	<i>Descrizione</i>
<i>1</i>	Compressore
<i>2</i>	Lamierino di separazione completo
<i>3</i>	Connettore corrente di comando
<i>4</i>	Cavetto di messa a terra
<i>5</i>	Connettore corrente principale

4.2.19.2 Funzionamento impianto pneumatico

L'impianto pneumatico produce aria compressa con un sovraccarico all'interno della condotta principale fino a 10,5 bar. L'aria compressa viene raffreddata e asciugata dall'impianto e successivamente trasportata nel sistema pneumatico del veicolo. L'impianto pneumatico viene controllato automaticamente dalla logica di veicolo.

4.2.20 Compressore

Il compressore a pistone aspira l'aria circostante e la trasforma in aria compressa con una sovrappressione di massimo 12,5 bar.

4.2.20.1 Struttura del compressore

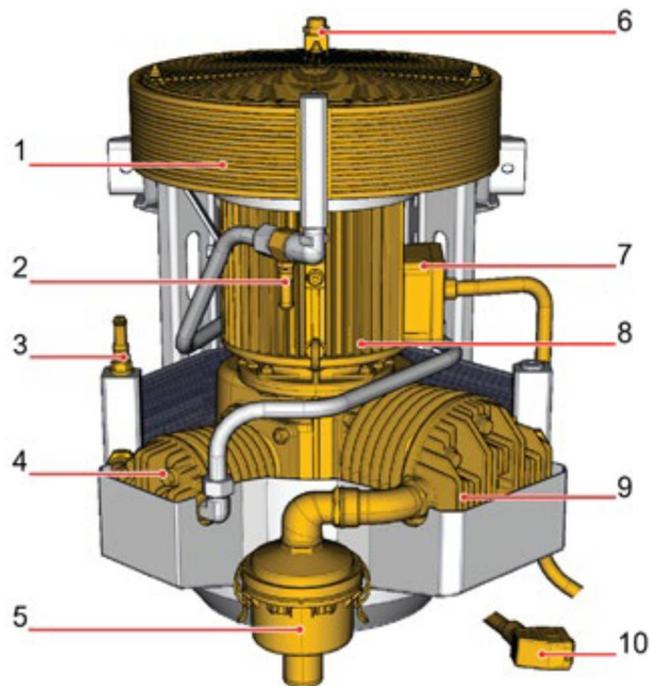


Figura 4.2.20.1.1 – Schema costruttivo del motocompressore elettrico a doppio stadio

Sigla	Descrizione
1	Radiatore ad anello
2	Valvola di sicurezza del radiatore ad anello
3	Valvola di sicurezza di livello intermedio
4	Blocco cilindro 2° livello (alta pressione)
5	Filtro dell'aria
6	Raccordo per aria compressa
7	Morsettiera corrente principale
8	Motore elettrico
9	Blocco cilindro 1° livello (bassa pressione)
10	Connettore corrente principale

Nel gruppo di produzione e trattamento aria è integrato un compressore a pistoni. Il motore del compressore è collegato all'alimentazione ausiliaria del veicolo ed è protetto da sovraccarichi mediante un salvamotore. L'accensione e lo spegnimento avvengono mediante il dispositivo di comando del veicolo. La descrizione dettagliata del compressore è riportata nel manuale d'uso del produttore.

4.2.20.2 Funzionamento del compressore

Il compressore a pistone viene azionato da un motore elettrico. Mediante un filtro dell'aria esso aspira l'aria circostante e la condensa in due fasi di "bassa pressione" e "alta pressione". In ciascuna fase di condensazione una valvola di sicurezza limita la pressione corrispondente. Dopo il processo di condensazione l'aria compressa viene dapprima raffreddata da un refrigeratore anulare e successivamente introdotta nell'impianto di essiccazione aria.

4.2.21 Impianto essiccazione aria

L'impianto di essiccazione d'aria riduce il contenuto d'acqua dell'aria compressa a un livello di umidità residua molto contenuto.

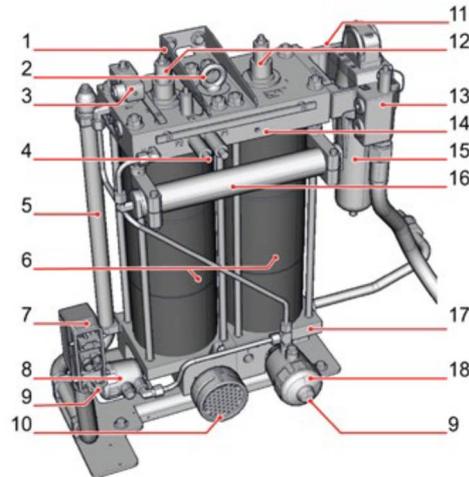


Figura 4.2.21.1 – Essiccatore aria compressa

Sigla	Descrizione
1	Supporto laterale
2	Vite ad anello
3	Valvola elettromagnetica
4	Sensori di pressione
5	Tubo flessibile
6	Torri di essiccazione
7	Connettore corrente di comando
8	Valvola a 3/2-vie (scarico condensa)
9	Indicatore di livello indicatore di commutazione valvola a 3/2 vie
10	Silenziatore
11	Supporto del filtro ingresso dell'aria
12	Valvole di ritegno per la pressione minima
13	Supporto del filtro uscita dell'aria
14	Testata di appoggio
15	Filtro dell'aria compressa
16	Volume aria supplementare
17	Piastra pedale
18	Valvola a 3/2-vie (ingresso aria)

L'impianto di essiccazione (tipo TL7) è provvisto di due tubi con separatori d'acqua integrati. La pressione esercitata nei tubi dell'essiccatore è misurata da sensori di pressione e trasmessa alla diagnostica del veicolo.

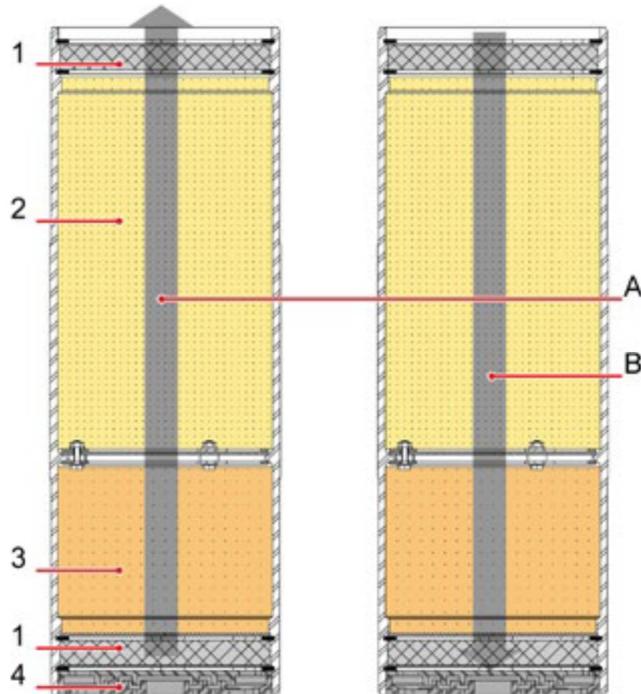


Figura 4.2.21.24 – Schema funzionale dell'essiccatore d'aria

<i>Sigla</i>	<i>Descrizione</i>
<i>1</i>	Camera di polverizzazione dell'aria
<i>2</i>	Essiccante 2
<i>3</i>	Essiccante 1
<i>4</i>	Separatore d'acqua/Scarico condensa
<i>A</i>	Direzione di flusso essiccazione
<i>B</i>	Direzione di flusso rigenerazione

4.2.21.1 Funzionamento impianto di essiccazione dell'aria

Le due torri d'essiccazione si trovano alternativamente in una fase di essiccazione e di rigenerazione. Il cambio avviene ogni 60 secondi. Il calo di pressione nelle condotte aria di comando durante il cambio di processo è compensato da un volume d'aria supplementare. Durante il processo di asciugatura l'aria compressa viene turbinata da uno strato di granulato ceramico per creare condizioni di asciugatura migliori. L'aria compressa attraversa poi due strati essiccanti che ne eliminano l'umidità. Mediante uno schermo parte dell'aria compressa essiccata viene convogliata nel secondo tubo dell'essiccatore e usata per l'asciugatura del granulato umido. Dopo questa rigenerazione viene eliminata la condensa formatasi sul separatore di acqua e sul silenziatore. La pressione nel processo di asciugatura è pari a 8-10 bar costanti e nel processo di rigenerazione al massimo a 1 bar.

4.2.21.2 Valvole

Nella direzione di flusso le valvole di ritegno di minima pressione si aprono da una pressione di circa 8 bar. Quest'ultima è regolabile e serve al corretto funzionamento dell'essiccante. In direzione di bloccaggio le valvole impediscono il ritorno dell'aria compressa nel tubo dell'essiccatore.

Le valvole a 3/2 vie regolano l'aspirazione di aria nel ciclo di funzionamento e lo scarico di condensa sui tubi dell'essiccatore.

La valvola magnetica controlla le valvole a 3/2 vie e il corretto scambio tra processo di lavoro e di rigenerazione.

4.2.21.3 Processo di drenaggio

A partire da una temperatura esterna di 5 °C o inferiore viene avviato un processo di drenaggio prima dell'arresto dell'impianto (ad es. veicolo in modalità stand-by). In questo lasso di tempo entrambi i tubi dell'essiccatore vengono puliti con aria in modo alternato per 3 s. Questo ciclo viene ripetuto 5 volte e l'acqua residua viene espulsa dal sistema mediante un deumidificatore. Durante l'intero processo di drenaggio il compressore produce altra aria compressa.

4.2.22 Filtro aria compressa

Il filtro dell'aria compressa elimina le particelle solide più piccole dall'aria compressa essiccata per evitare intasamenti nelle tubature e negli utilizzatori finali.

4.2.22.1 Struttura del filtro dell'aria compressa

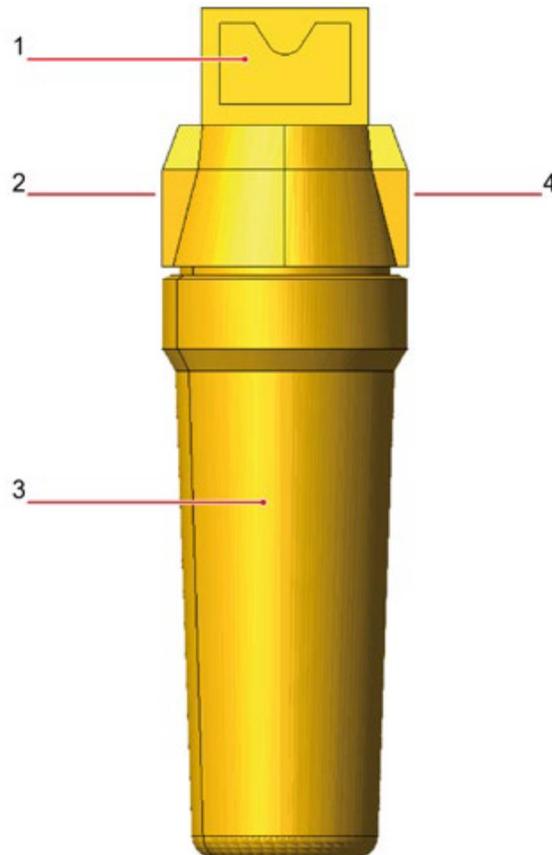


Figura 4.2.22.1.1 – Filtro dell'aria compressa

Sigla	Descrizione
1	Indicatore della pressione differenziale per la manutenzione
2	Ingresso dell'aria dell'impianto di essiccazione aria
3	Alloggiamento del filtro
4	Fuoriuscita aria

L'alloggiamento del filtro contiene l'elemento filtrante con due livelli di filtrazione. Il primo livello di filtrazione è costituito da più strati di fibre di vetro e da un foglio di fibra di vetro di appoggio. Il secondo livello di filtrazione è costituito da una miscela di più strati di fibre di vetro impregnate e di microfibre.

4.2.22.2 Funzionamento del filtro dell'aria compressa

Le particelle solide vengono filtrate dall'aria compressa secondo il principio della filtrazione di profondità. L'aria passa in modo radiale attraverso il rivestimento di supporto esterno perforato dell'elemento filtrante. Nel primo livello di filtrazione vengono trattenute le particelle più grosse. Il secondo livello di filtrazione rimuove le particelle solide di dimensioni fino ad 1 micron. L'aria filtrata fuoriesce dall'elemento filtrante attraverso il rivestimento di supporto interno perforato.

4.2.23 Sistema frenante

Il veicolo è dotato di tre sistemi di frenatura:

- Freno elettrodinamico
- Freno pneumatico
- Freno a caricamento a molla

Le modalità di frenatura sono le seguenti:

- Frenatura di servizio
- Frenatura d'urgenza
- Frenatura di stazionamento

4.2.23.1 Frenatura di servizio

La frenatura di servizio è prioritariamente realizzata mediante l'utilizzo del freno elettrodinamico. Il comando di attivazione della frenatura elettrodinamica è generato dalla logica di veicolo (FLG) a fronte della movimentazione del combinatore di trazione/frenatura da parte del macchinista.

La frenatura elettrodinamica è realizzata dai motori di trazione che, in tale caso, fungono da generatori.

L'energia elettrica generata dai motori di trazione è successivamente trasformata dai convertitori statici di trazione ed è quindi in parte recuperata per l'alimentazione dei servizi ausiliari di bordo, la parte rimanente è dissipata in calore dai reostati di frenatura.

Nel caso in cui la forza frenante generata dal freno elettrodinamico non fosse sufficiente a garantire la decelerazione necessaria al veicolo, ad esempio nelle condizioni di pieno carico ed elevate velocità, la logica di veicolo provvede ad integrare la quota mancante tramite l'inserzione (con comando elettrico) della frenatura pneumatica, che si traduce in un abbassamento della pressione nella condotta generale e nella conseguente attivazione dei cilindri freno sui carrelli.

La frenatura pneumatica di servizio può essere anche direttamente attivata dal comando elettrico generato dalla movimentazione, da parte del macchinista, della leva del freno (rubinetto di frenatura), senza l'interposizione della logica di veicolo.

La frenatura pneumatica è dimensionata per consentire autonomamente l'arresto del veicolo.

La scelta di attivare prioritariamente la frenatura elettrodinamica consente tre vantaggi:

- Pieno sfruttamento dell'elevata aderenza derivante dal modulo di trazione
- Minore usura dei dischi freno
- Recupero parziale dell'energia di frenatura per i servizi ausiliari e quindi minori consumi di carburante da parte dei motori diesel.

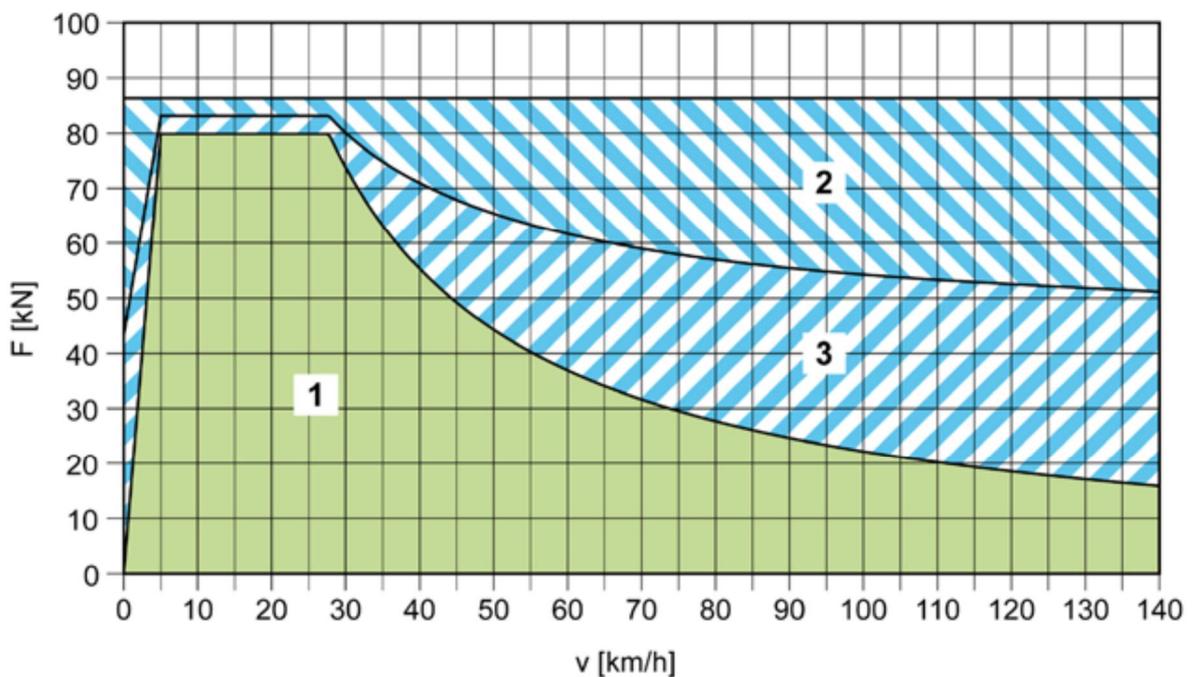


Figura 4.2.23.1.1 – Diagramma del massimo sforzo di frenatura con frenatura elettrodinamica attiva

1	<i>Sforzo di frenatura elettrodinamico carrello motore</i>
2	<i>Sforzo di frenatura pneumatico carrelli portanti</i>
3	<i>Sforzo di frenatura pneumatico carrello motore</i>

4.2.23.2 Frenatura d'urgenza

La frenatura di emergenza avviene in modo totalmente pneumatico.

Essa è realizzata mediante lo scarico della condotta generale che si verifica a seguito dell'intervento dei dispositivi di emergenza e sicurezza presenti sul veicolo.

In caso di attivazione della frenatura di emergenza la logica di veicolo ed il circuito elettrico di comando e blocco del treno intervengono simultaneamente e separatamente per inibire il funzionamento dei convertitori ed impedire l'attivazione della frenatura elettrodinamica.

4.2.23.3 Frenatura di stazionamento

Il freno di stazionamento (o freno a molla) frena, a veicolo fermo, gli assi a cui è applicato ed impedisce lo spostamento del veicolo.

A fronte di un comando da banco di manovra, il conseguente svuotamento della condotta di comando del freno di stazionamento (originariamente alimentata dalla condotta generale) genera il rilascio della molla all'interno del cilindro del freno di stazionamento. La forza della molla, non più compressa, aziona così la pinza del freno.

4.2.23.4 Componenti principali dell'impianto di frenatura

I componenti essenziali dell'impianto frenante e dell'aria compressa dei veicoli GTW sono pertanto:

- Il sistema di generazione e trattamento aria (vedi Capitolo 4.2.16 Gruppo generazione aria).
- Il quadro principale delle strumentazioni dell'impianto frenante (PTM) posto nel modulo di trazione, che comprende i rubinetti del freno continuo, le due valvole di comando, oltre valvole e rubinetti di esclusione per i gruppi frenanti.
- Un quadro PTF (quadro pneumatico nelle semicasse) supplementare in uno dei montanti porta di ogni vagone passeggeri, con valvole e rubinetti di chiusura
- Un impianto di regolazione antipattinamento a fianco del quadro PTM (quadro pneumatico nel modulo di trazione), che unitamente ai segnali dei generatori di impulsi sugli assi registra i casi di pattinamento e i ritardi critici e regola adeguatamente la forza frenante tramite le valvole di scarico
- Due valvole del freno ad azione rapida/valvola SIFA in un armadio alla parete laterale della cabina di guida B
- I comandi sul banco di manovra e nella semicassa (freno d'emergenza)

- Per il sistema di segnalamento RSC9/SCMT/SSC, una valvola del freno pneumatica ad azione rapida nell'armadio FRR2 della cabina di guida B.

4.2.23.5 Freno pneumatico

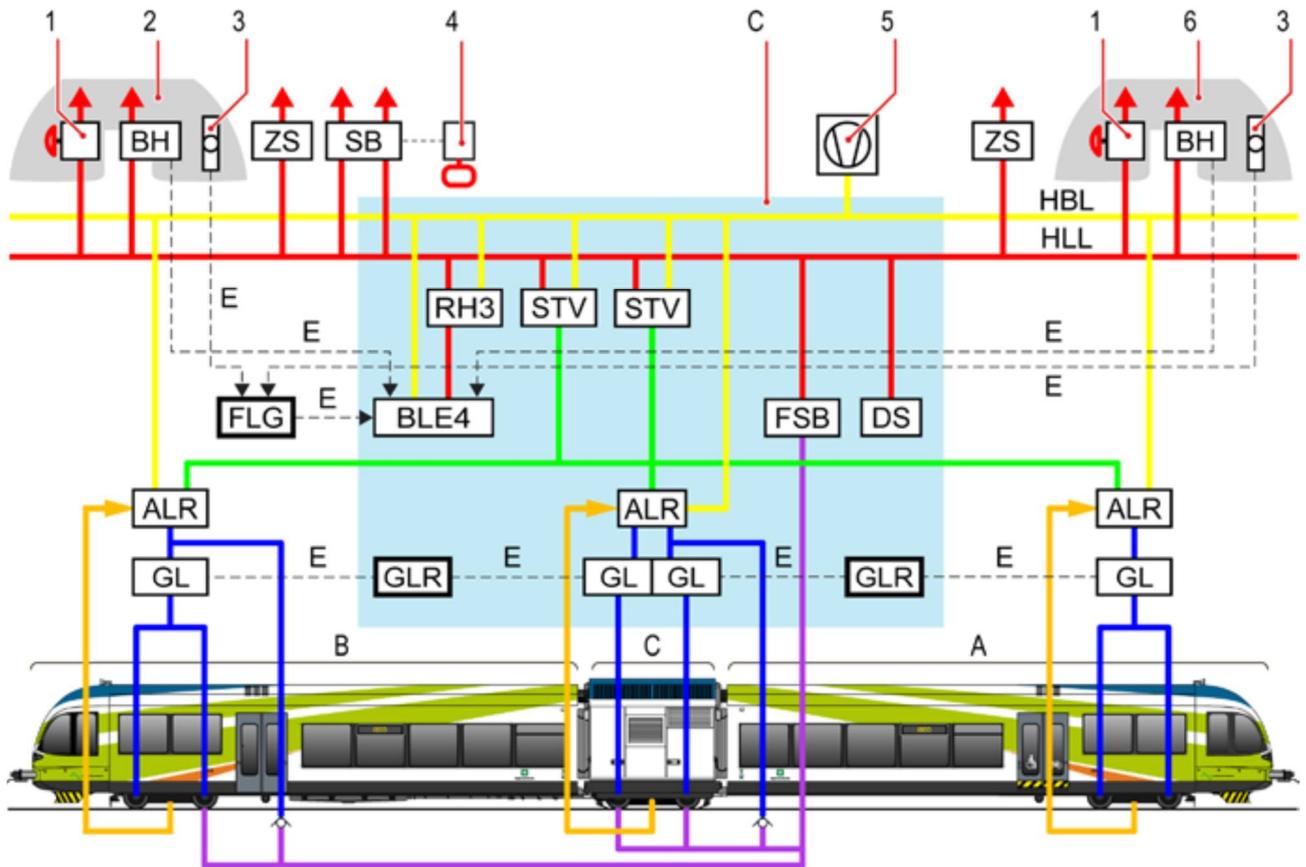


Figura 4.2.23.5.1 – Schema di principio del freno pneumatico

Abbreviazione	Denominazione
1	Comando arresto di emergenza
2	Banco di guida – Lato B
3	Combinatore di comando
4	Freno d'emergenza passeggeri
5	Gruppo di produzione e trattamento aria
6	Banco di guida – Lato A
A	Carrozza A
B	Carrozza B
C	Modulo di trazione C
E	Segnale elettrico
ALR	Carico Variabile
BH	Leva del freno
BLE	Unità di frenatura / sfrenatura
DS	Pressostato condotta generale
FLG	Apparato di controllo veicolo
FSB	Valvola del freno con accumulatore a molla
GL	Valvola antipattinamento
GLR	Calcolatore del dispositivo antipattinamento
VR	Valvola relè e valvola rialimentazione
SB	Elettrovalvole di frenatura di emergenza
STV	Valvola di comando - distributore

Abbreviazione	Denominazione
Linea Gialla	Condotta principale di alimentazione HBL (10 bar)
Linea Rossa	Condotta Generale HLL (5 bar)
Linea Verde	Pressione di comando
Linea Blu	Pressione nei cilindri freno
Linea Arancione	Correzione del carico
Line Viola	Comando del freno a caricamento di molla

La condotta generale (linea rossa) ha la funzione di trasmettere con continuità il comando di frenatura pneumatica di servizio e di emergenza; nel contempo essa ha il compito di alimentare il circuito pneumatico di comando del freno di stazionamento (linea viola).

La regolazione del comando "indiretto" della frenatura pneumatica di servizio e di emergenza avviene mediante l'abbassamento della pressione nella condotta generale, viceversa la ricarica della condotta generale successiva ad una frenatura pneumatica implica la rimozione della frenatura stessa.

Nell'ambito della frenatura pneumatica di servizio, il comando pneumatico iniziale è sempre generato dall'unità di frenatura/sfrenatura (BLE4), alimentata pneumaticamente dalla condotta principale (linea gialla).

Tale dispositivo è a sua volta attivato da un precedente comando elettrico che può essere generato da:

- Movimentazione della leva del freno (BH) da parte del macchinista;
- Logica di veicolo (FLG) in conseguenza alla movimentazione, sempre da parte del macchinista, del combinatore di comando (3).

L'unità di frenatura/sfrenatura "innesca" il processo pneumatico di frenatura attivando a sua volta la valvola relè RH3, anch'essa alimentata direttamente dalla condotta principale.

Tale dispositivo, puramente pneumatico, genera, a sua volta, la depressione di comando, variabile da 5 bar (sfrenatura) a 3,2 bar (frenatura massima di servizio) lungo la condotta generale, che perviene ai dispositivi distributori (STV) il cui compito è quello di regolare il comando di frenatura verso gli attuatori posti sui carrelli (linea verde).

Su ogni veicolo (semicassa) sono connessi alla condotta generale due distributori rispettivamente dedicati al carrello motore e al carrello portante.

I distributori sono del tipo Knorr STV 200. Contrariamente ad altri dispositivi ana-loghi essi non utilizzano una pressione di riferimento (generata da un serbatoio di comando) bensì una molla meccanica. Ciò consente una più rapida generazione del comando di frenatura, anche nel caso di un veicolo scarico d'aria.

La pressione "pilota" così realizzata (linea verde) è quindi trasmessa verso le valvole relè del carico variabile (ALR) di ciascun carrello che, in funzione del valore della pressione di precomando e della pressione della rispettiva sospensione secondaria (misura del peso o "carico"), generano la pressione di alimentazione dei cilindri freno (linea blu).

Le valvole a relè sono direttamente alimentate dalla condotta principale e/o dai serbatoi ausiliari (40 litri su carrello portante, 60 litri su carrello motore).

Il dimensionamento del circuito pneumatico è tale da consentire sino a 3 frenature pneumatiche complete anche in assenza di alimentazione della condotta principale.

La ricarica della condotta generale ed il conseguente rilascio dei cilindri freno avviene con modalità analoghe, tramite le unità BLE ed RH3 a fronte della movimentazione, da parte del macchinista, della sola leva del freno BH.

Nel caso di una frenatura di emergenza, la pressione della condotta generale è rapidamente diminuita a causa dell'intervento dei dispositivi di sicurezza che aprono la condotta verso l'esterno. Le unità di frenatura/sfrenatura BLE ed RH3 sono quindi pneumaticamente escluse poiché l'alimentazione della condotta generale è inibita da parte dell'elettrovalvola di intercettazione.

4.2.24 Sistema ungibordo

Gli ugelli della lubrificazione bordini sono montati sugli assi portanti di testa. Per il senso di marcia "A" vengono azionate le valvole elettropneumatiche [23A23/1-E300/1] e per il senso di marcia "B" le valvole elettropneumatiche [23A23/2-E300/2]. La lubrificazione viene effettuata a seconda del percorso con un impulso sulla valvola elettropneumatica della semicassa di testa, come illustrato dalla seguente tabella:

<i>Range di velocità</i>	<i>Distanza</i>	<i>Tempo di spruzzatura</i>
5–80 km/h	200 m	6 s
80–120 km/h	500 m	6 s
> 120 km/h	1.500 m	6 s

Il rilevamento della distanza percorsa comincia alla fine del tempo di spruzzatura.

In base al senso di marcia dell'apparato di controllo del veicolo e alla velocità di riferimento, ogni veicolo rilascia automaticamente la lubrificazione bordini. La durata dell'impulso di spruzzatura è di 6 secondi.

A una velocità inferiore a 5 km/h la lubrificazione bordini non è attiva.

Inoltre la lubrificazione dei bordini delle ruote è bloccata in caso di intervento del dispositivo antislittamento/antipattinamento o in caso di frenatura rapida.

4.2.25 Sospensione pneumatica

Con una pressione inferiore a 2,5 bar i pressostati commutano la sospensione pneumatica nel funzionamento di emergenza.

La sospensione pneumatica dispone di una regolazione di livello automatica e dipendente dal carico. Nei portamolla viene generata, tramite aria compressa, una forza contraria per compensare i movimenti elastici della sospensione secondaria. In questo modo l'altezza della cassa rimane costante, indipendentemente dal carico. Sui carrelli è presente un indicatore di livello verniciato in rosso e bianco. La sospensione pneumatica è impostata correttamente se il bordo inferiore della cassa si trova all'interno dell'area bianca.

Attraverso la misurazione del carico è possibile monitorare lo stato della sospensione pneumatica.

In caso di una pressione troppo bassa la velocità ammessa viene ridotta a 60 km/h.

Un guasto nel sistema di sospensione pneumatica viene segnalato al veicolo di testa mediante il CAN-bus e tramite il pulsante [42H01].

4.2.26 Sabbiere

Sui carrelli motore sono installate le sabbiere. Le due sabbiere si trovano rispettivamente nel senso di marcia di fronte all'asse motore di testa. La loro attuazione può essere manuale.

Le valvole aria e sabbia vengono attivate contemporaneamente. Le valvole aria vengono disattivate con un ritardo di 3 s rispetto alle valvole sabbia per svuotare soffiando i condotti sabbiere.

Nella trazione multipla i veicoli azionano contemporaneamente le sabbiere. Il co-mando sabbiera viene trasmesso tramite bus CAN. Sul veicolo di testa le due sabbiere vengono azionate indipendentemente dal senso di marcia.

La sabbatura automatica viene attivata in caso di una frenata rapida (controllo pressione della condotta generale inferiore a 2,8 bar) e uno scivolamento contemporaneo di un assile (segnale del dispositivo antislittamento). Condizione per l'attivazione della sabbatura automatica da parte dell'apparato di controllo del veicolo è una velocità superiore a 30 km/h. In questo caso la valvola sabbiera viene attivata a intervalli temporali regolabili liberamente. Nella regolazione di fabbrica la cadenza è impostata su 0,2 s di sabbatura e 2 s di pausa. La sabbatura automatica termina con l'arresto del veicolo o qualora la pressione della condotta generale superi 3,1 bar.

4.2.27 Antipattinamento

Il sistema antipattinamento impedisce che le ruote del veicolo si blocchino durante la frenatura. Se la forza di frenatura è tale da compromettere l'aderenza tra la ruota e i binari, il rispettivo assile ruota più lentamente o si blocca completamente.

L'antipattinamento riconosce tale situazione e riduce la forza di frenatura finché l'assile non ruota nuovamente in modo normale.

La regolazione del sistema antipattinamento avviene in due gruppi separati:

- Sistema antipattinamento per la frenatura elettrodinamica (realizzato direttamente dalla logica di veicolo)
 - Limita la coppia del motore di trazione (con cambi rapidi di regime)
 - Riduce la coppia del motore elettrico (con cambi lenti di regime)
- Limita la coppia del motore di trazione (con cambi rapidi di regime)
 - Riduce la coppia del motore elettrico (con cambi lenti di regime)

L'apparecchio di regolazione antipattinante misura le velocità di tutti gli assili e controlla le valvole antipattinamento pneumatiche.

Il dispositivo di antipattinamento pneumatico è essenzialmente composto da:

- Due gruppi di calcolatori (GL) che comandano rispettivamente un carrello portante e l'asse motore vicino
- Generatori tachimetrici separati che controllano ogni coppia di ruote
- Valvole antipattinamento separate (GSV) che comandano individualmente, riducendo od aumentando opportunamente la pressione dei cilindri del freno, per assi motrici e carrelli portanti

L'apparecchio di controllo antipattinamento funziona indipendentemente dalla logica di veicolo. Nel caso di contemporanea presenza di frenatura pneumatica ed elettrica su carrello motore, all'atto del rilevamento di una condizione di pattinamento degli assi motori interviene prima il sistema di antipattinamento elettrico che riduce la forza di frenatura elettrica; ciò avviene in ragione della elevata "dinamica" della regolazione della frenatura elettrica (veloce trasmissione di segnali, veloci variazioni di coppia) rispetto al sistema di antipattinamento pneumatico). Tale intervento è visualizzato sul monitor diagnostico. Se le condizioni di pattinamento permangono interviene anche il sistema di antipattinamento pneumatico.

Qualora la frenatura elettrodinamica non fosse più disponibile, sui carrelli motori subentra la sola frenatura pneumatica ed il controllo della funzione antipattinante dei carrelli motori è effettuato dal dispositivo per il freno pneumatico.

Il recupero delle condizioni di aderenza implica dapprima l'attivazione della frenatura pneumatica su assi motori e, successivamente, il ripristino della frenatura elettrica.

Il dispositivo antipattinamento pneumatico viene inserito quando la pressione della condotta generale supera 3,1 bar. Si disinserisce con un ritardo di 10 minuti dopo che la pressione nella condotta generale è scesa sotto i 2,8 bar.

Nel caso di malfunzionamento di una centrale di controllo MGS2, almeno metà della forza frenante del veicolo resta attiva.

Nel caso di un guasto dell'intero dispositivo pneumatico antipattinamento (per es. guasto dell'alimentazione), le valvole antipattinamento non vengono più comandate. Tutta la pressione viene trasmessa verso i cilindri freno.

Le condizioni di guasto sono visualizzate al macchinista su monitor diagnostico.

4.3 Stato attuale di manutenzione

Ad oggi Sistemi Territoriali S.p.A. può far fede su una squadra manutentiva costituita da:

- 1 Coordinatore Unità Tecnica Deposito Officina (CUTDO)
- 1 Vice-CUTDO
- 2 carrellisti
- 2 meccanici
- 2 elettricisti
- 2 manovratori abilitati alla verifica

La squadra così composta consente di gestire al meglio le manutenzioni programmate e correttive delle automotrici storiche dell'impresa (Aln 663 e 668) sulla base degli elevati standard di sicurezza imposti dall'Agenzia Nazionale di Sicurezza Ferroviaria (ANSF). Ciascun manutentore infatti viene addestrato per l'attività manutentiva che dovrà svolgere e, su indicazione dell'ANSF, ne si impone di esercitare esclusivamente la mansione per il quale viene abilitato dall'impresa ferroviaria che ne assegna l'incarico.

Tale squadra manutentiva risulta al contempo inadeguata a gestire la manutenzione programmata e correttiva dei nuovi mezzi GTW se non per i soli controlli e verifiche periodiche prescritte dalla trama manutentiva dei veicoli specificata dal costruttore.

Si ha pertanto che, per le manutenzioni programmate e manutentive delle nuove automotrici, Sistemi Territoriali S.p.A. faccia ricorso ad una manutenzione sub-appaltata al costruttore (Stadler) mediante specifica squadra manutentiva altamente specializzata.

Questa forma di manutenzione era prevista negli accordi di garanzia intrapresi durante l'acquisto dei mezzi, ma il superamento del decimo anno di esercizio sta portando alla scadenza di tale accordo.

Data la struttura pubblica dell'impresa (interamente partecipata al 99,9% dalla Regione Veneto) l'intenzione primaria è il contenimento dei costi che, con l'utilizzo di personale altamente specializzato esterno all'impresa, tenderebbero a salire e ad esser poco competitivi con una manutenzione "fatta in casa".

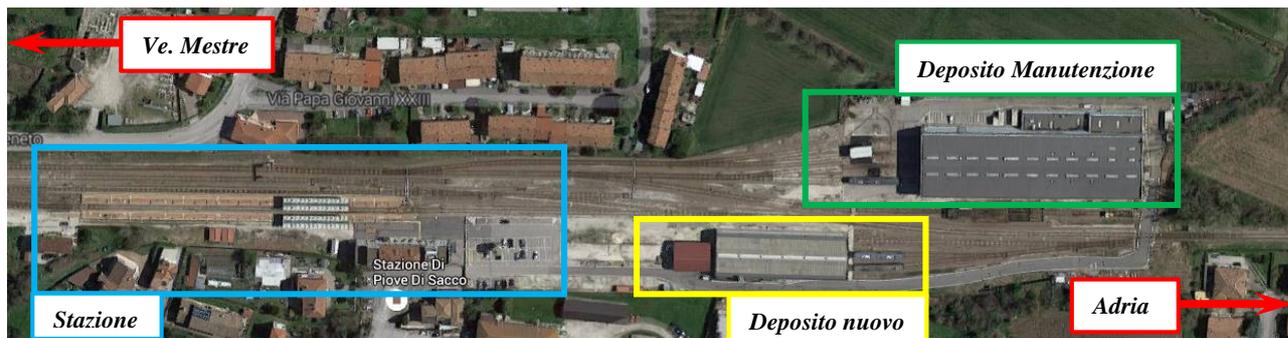


Figura 4.3.1 – Vista satellitare della stazione ferroviaria di Piove di Sacco (PD)

A prescindere quindi della necessità di assunzione di nuovo personale che vada in forza a quello attualmente impiegato nel deposito manutenzione di Piove di Sacco, e dalla necessità di far abilitare i manutentori alle specifiche mansioni definite dall'ANSF per i GTW, risulterebbe estremamente utile andare a valutare una manutenzione preventiva e correttiva svolta esclusivamente da personale interno all'impresa. A maggior ragione, al fine di migliorare le disponibilità delle macchine e una ottimizzazione del personale addetto alla manutenzione è possibile parlare di manutenzione che deve svolgersi principalmente a livello preventivo anziché correttivo: per un investimento iniziale della nuova politica manutentiva difficilmente si riuscirebbe a creare una squadra di manutentori pari a quella che mette a disposizione il costruttore (in termini di numero di persone) e, le difficoltà a gestire i guasti che vengono quotidianamente a crearsi sia per il materiale “storico” che per quello di ultima generazione comporterebbe un allungamento dei tempi di fermo macchina o la necessità di adottare riparazioni incomplete al fine di garantire il servizio pubblico.

Il fatto di garantire una manutenzione preventiva ottimizzata consentirebbe allo stesso tempo di migliorare le condizioni lavorative sia dei manutentori che del personale di macchina (macchinisti) che devono far sempre ricorso all'esperienza per ovviare ai guasti di medio-lieve entità ma che nel tempo accumulerebbero stress e ritardi inutili al servizio e alla clientela.

Nel caso quindi si riesca ad avviare la nuova forma manutentiva composta da solo personale interno sopraggiunge la grave problematica della gestione delle manutenzioni che, basate su quanto indicato dal costruttore, potrebbero non risultare ottimali e convergere in guasti che obbligherebbero il ricovero del mezzo.

Si apre una parentesi riguardo un altro punto a favore per una manutenzione preventiva, ovvero la necessità di ruotare il materiale rotabile tra due sedi di esercizio:

- **Piove di Sacco** per le linee *Adria ↔ Venezia S.L.* e *Rovigo ↔ Chioggia*
- **Rovigo** per le linee *Rovigo ↔ Verona P.N.* e *Rovigo ↔ Chioggia*

Come si può evincere la linea in comune *Rovigo* ↔ *Chioggia* viene pertanto utilizzata come direttrice di scambio del materiale rotabile tra i due bacini (Piove di Sacco e Rovigo) dove, tramite turni opportunamente elaborati si ha l'invio e il rientro giornaliero dei veicoli da Piove di Sacco e Rovigo e viceversa.

In caso di guasti che impediscano l'utilizzo di un rotabile nella sede di Rovigo la Sala Operativa (SO) si adopera per effettuare uno scambio tempestivo dei mezzi tra il personale viaggiante di Piove di Sacco e quello di Rovigo che può avvenire o nella stazione di Adria (nodo tra le tre direttrici ovvero Venezia, Chioggia e Rovigo) o direttamente nella stazione di Rovigo.

In casi più gravi tali per cui non è possibile muovere il veicolo ferroviario, l'officina di Piove di Sacco si attiva tramite unità mobile per portare sul posto tutto il necessario quantomeno per rendere il rotabile trainabile da uno funzionario al fine di permetterne il rientro in officina dove verranno eseguite le riparazioni più difficoltose o che necessitano di particolari attrezzature.

Chiudiamo la parentesi della rotazione dei mezzi e concludiamo l'adozione di una manutenzione preventiva che, dovendo iniziare da zero, dovrà per forza di cose esser definita in ogni sua parte in assenza di dati.

4.4 Principali guasti riscontrati

Volendo fare alcune considerazioni al fine di giustificare l'applicazione di una manutenzione preventiva in assenza di dati, dato che i componenti costituenti una automotrice sono molteplici e di variabile complessità, si è deciso di applicare il metodo esposto nel capitolo 3.6.2 a componenti rientranti in uno specifico gruppo funzionale:

- Elettrico/Elettronico
- Pneumatico
- Meccanico

Si sono raccolti pertanto i principali guasti che si sono verificati in questi anni di esercizio che hanno comportato ritardi o soppressioni di servizio: in questo modo l'adozione di una manutenzione preventiva per questi componenti garantirebbe una maggior efficienza di servizio e un abbattimento dei costi di fermo macchina unito ai danni del mancato servizio.

Ci si concentra pertanto sui seguenti componenti:

- **Parte elettrica/elettronica** → Convertitori di potenza IGBT
- **Parte pneumatica** → Valvola freno pneumatico nei quadri PTM e PTF
- **Parte meccanica** → Camicie motori Diesel MAN

4.5 Analisi di manutenzione preventiva per i convertitori IGBT

Le motivazioni che hanno spinto a tenere in buona considerazione i guasti a questo dispositivo elettronico sono associate al semplice fatto che, quando un convertitore decide di non voler più funzionare, vengono esclusi tutti gli azionamenti ad esso associati, in particolar modo non è più possibile comandare il motore elettrico ad esso collegato, né in trazione, né in frenatura elettrodinamica.

Di per sé, l'esclusione di uno dei quattro convertitori di cui dispone ad esempio un GTW 4/12 non è un grosso problema in quanto i tre motori rimanenti supportano ampiamente le prestazioni mediamente richieste dalle varie tratte di esercizio; caso diverso invece è per il GTW 2/6 che, vede ridursi del 50% la propria prestazione oltre che a ridurre drasticamente la percentuale di massa frenata. L'agente di condotta (macchinista) è obbligato quindi ad utilizzare delle procedure dette di "degrado" che molto spesso vedono ridurre le velocità di linea oltre che adottare tutte le accortezze del caso per portare al minimo lo "stress" che grava sull'unico convertitore attivo.

La questione si complica particolarmente nei periodi estivi dove le alte temperature obbligano ad utilizzare l'impianto di climatizzazione che, rimanendo attivo su ambo i vestiboli viaggiatori va ad aumentare il carico sulla generatrice e sul convertitore ancora in funzione.

Se al contempo si aggiungono situazioni particolari di circolazione, quali ad esempio i ritardi da recuperare solitamente associati alla necessità di alcuni passeggeri di utilizzare coincidenze nelle stazioni principali e/o fasce orarie dei pendolari che tendono a sovraffollare il veicolo, il carico del motore elettrico sommato a quello degli ausiliari (luci, climatizzazione, impianto pneumatico, sottosistema di bordo SSB per il controllo della marcia del treno) potrebbe far aumentare notevolmente le temperature del convertitore attivo portandolo nel breve periodo al cedimento.

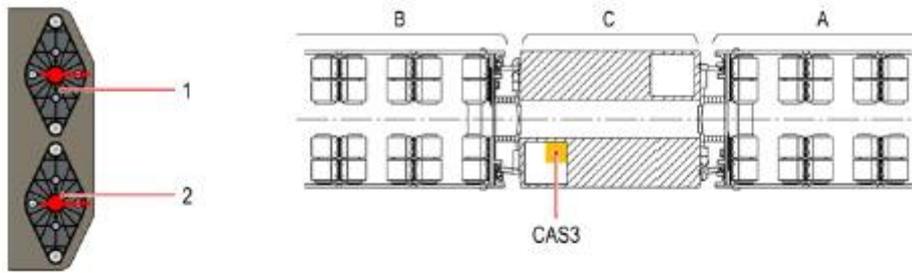
Qualora dovesse avvenire il cedimento anche del secondo convertitore il treno presenta due possibilità:

1. Se il tempo e il luogo lo consentono (località di servizio secondarie e linee poco trafficate da altri convogli): Il macchinista può richiedere al Dirigente Centrale Operativo "DCO", che controlla la circolazione, la cosiddetta "accudienza" del mezzo.

Se la situazione lo consente, il DCO concorda l'autorizzazione ad effettuare uno o al massimo due tentativi per il ripristino della macchina che non superino complessivamente i 10 minuti.

Il macchinista deve pertanto adoperarsi per tentare un reset della logica di bordo mediante il cosiddetto "stacco delle batterie 24V".

In ciascun modulo di trazione si trovano due batterie con un proprio sezionatore.



Sezionatore della batteria

1	32S01/1: Sezionatore per la batteria 1	2	32S01/2: Sezionatore per la batteria 2
---	--	---	--

Posizioni dei sezionatori delle batterie



Posizione ON: batteria accesa



Posizione OFF: batteria esclusa

Figura 4.5.1 – Isolamento delle batterie 24V tramite apposito quadro elettrico all'interno del modulo di trazione

L'operazione di per sé prevede di mantenere il veicolo senza alimentazione di bassa tensione per almeno 2 minuti fino ad un massimo di 5 (tempo necessario a far scaricare completamente alcuni condensatori che mantengono stabile la tensione delle schede elettroniche che gestiscono l'unità logica).

Solitamente questa operazione consente di ripristinare il convertitore in avaria per eccessivo carico.

Sarà poi compito del macchinista attuare tutte gli accorgimenti necessari per evitare che si ripresenti lo stesso inconveniente.

2. Treno fermo in linea che non può permanere per il tempo utile all'accudienza o, caso più critico, "stacco delle batterie" non efficace:

Il macchinista deve darne prontamente avviso al DCO e richiedere allo stesso tempo il "soccorso in linea". Sarà compito del DCO con la collaborazione della Sala Operativa "S.O." dell'impresa ferroviaria di appartenenza, attivarsi per organizzare nel minor tempo possibile il recupero dei passeggeri rimasti a bordo e il rientro del mezzo guasto.

La condizione numero 2 è pertanto quella più problematica poiché, il mancato servizio, comporta delle penali che verranno imputate a posteriori all'impresa ferroviaria. Altra nota da non trascurare è l'organizzazione che deve essere intrapresa per trasferire il mezzo dal punto di guasto all'officina: la questione può risultare di poco conto nella linea *Adria – Venezia S.L.* poiché i treni transitano sempre per il deposito di Piove di Sacco, ma risulta di notevole impatto se il guasto dovesse avvenire sulla linea *Rovigo – Verona P.N.* dove, oltre ad avere un veicolo inutilizzabile per i turni successivi, si ha un enorme allungamento dei tempi di fermo macchina per poterlo riportare al deposito.

Dopo queste precisazioni andiamo ora a considerare ogni singolo guasto che ha portato all'impossibilità di utilizzare irrimediabilmente un singolo convertitore; per semplicità consideriamo per ciascun mezzo i primi cinque guasti a cui assoceremo i km percorsi prima del verificarsi dello stesso:

Veicolo ATR	Guasto 1	Guasto 2	Guasto 3	Guasto 4	Guasto 5
110 201	159.000	352.000	618.000	925.000	1.330.000
110 202	169.000	376.000	706.000	1.037.000	1.449.000
120 401-402	147.000	366.000	737.000	1.059.000	1.463.000
120 403-404	173.000	391.000	722.000	1.018.000	1.451.000
116 001	291.000	692.000	1.055.000	n.d.	n.d.
126 001	276.000	598.000	1.018.000	n.d.	n.d.
126 002	266.000	677.000	n.d.	n.d.	n.d.

Tabella 4.5.2 – Tabella chilometrica dei guasti per ogni singolo mezzo Stadler GTW

I riquadri contraddistinti con le iniziali “n.d.” indicano che il dato *non è disponibile* poiché, tale veicolo, non ha ancora riscontrato un guasto successivo a quello registrato alla precedente percorrenza, oltre che, per la minor anzianità di servizio del rotabile.

Come si può notare le percorrenze effettuate dagli ATR serie 110 e 120, tra un guasto ed un altro, sono minori rispetto al 116 e 126; questo perché la differenza di serie ha portato ad un miglioramento della gestione dell'elettronica di trazione/frenatura elettrodinamica. Questa affermazione viene tradotta specificando che le serie più vecchie, ovvero le 110 e 120, presentano un tempo di commutazione dei convertitori dallo stato di “*trazione attiva*” a “*frenatura elettrodinamica attiva*”, tramite leva di comando posta sul banco di guida, piuttosto “lenta”. Per “lenta” si intende qualche frazione di secondo che, se non rispettata lasciando permanere la leva di trazione nella posizione neutra, comporta un forte scossone da parte dei motori elettrici al veicolo (strattone che viene percepito inequivocabilmente). Tale scossone si traduce però

all'interno dei convertitori in archi elettrici che nel tempo tendono a degradare più rapidamente il sistema.

Nel caso degli ATR 116 e 126 tale fenomeno non si presenta poiché il software utilizzato in questa serie, essendo più recente, ha ovviato a tale problema rivedendo la gestione del passaggio da trazione a frenatura elettrodinamica.

Si ripropone ora la tabella precedente inserendo le singole differenze chilometriche tra un guasto ed un altro:

$$\Delta_{km} = km_{Guasto\ n+1} - km_{Guasto\ n}$$

Veicolo ATR	Guasto 1	ΔGuasto 2	ΔGuasto 3	ΔGuasto 4	ΔGuasto 5
110 201	159.000	193.000	266.000	307.000	405.000
110 202	169.000	207.000	330.000	331.000	412.000
120 401-402	147.000	219.000	317.000	322.000	404.000
120 403-404	173.000	218.000	331.000	296.000	433.000
116 001	291.000	338.000	426.000	n.d.	n.d.
126 001	276.000	322.000	420.000	n.d.	n.d.
126 002	266.000	411.000	n.d.	n.d.	n.d.

Tabella 4.5.3 – Cadenze dei guasti definite come differenze chilometriche tra un guasto e il successivo

Oltre ad osservare le differenze a livello di gestione elettronica tra le due serie di veicoli, con le differenze chilometriche così espresse è possibile notare come l'esperienza di condotta fatta dai macchinisti abbia nel tempo allungato la vita utile dei convertitori: nota la causa del problema su indicazioni da parte del capo officina (CUTDO) è stato possibile, tramite l'istruttore dei macchinisti, dare opportune indicazioni su come utilizzare correttamente la leva di comando nel passaggio da trazione a frenatura elettrodinamica.

A questo punto è possibile estrapolare un ipotetico *MTTF* da adottare e cercare di capire a quali costi si andrebbero in contro in base alle scelte di β e θ .

Per scegliere l'*MTTF* si decide di effettuare la media tra l'ultimo e il penultimo guasto poiché coincidenti ad un periodo temporale in cui il personale di macchina può esser considerato ottimamente addestrato e con esperienza utile ad evitare rotture indotte da manovre scorrette:

- $ATR\ 110.201 = \frac{307.000+405.000}{2} = 356.000\ km$
- $ATR\ 110.202 = \frac{331.000+412.000}{2} = 371.500\ km$
- $ATR\ 120.401 + 120.402 = \frac{322.000+404.000}{2} = 363.000\ km$
- $ATR\ 120.403 + 120.404 = \frac{296.000+433.000}{2} = 364.500\ km$
- $ATR\ 116.001 = \frac{338.000+426.000}{2} = 382.000\ km$
- $ATR\ 126.001 = \frac{322.000+420.000}{2} = 371.000\ km$
- $ATR\ 126.002 = \frac{266.000+411.000}{2} = 338.500\ km$

Di queste medie si effettua un'ulteriore media:

$$MTTF_{medio} = \frac{356 + 371,5 + 363 + 364,5 + 382 + 371 + 338,5}{7} \cdot 1000$$

$$MTTF_{medio} = \frac{2.546,5}{7} \cdot 1000 = 363.785\ km$$

A questo valore, su accordo dei manutentori, si applica un coefficiente di sicurezza basato sull'esperienza:

$$MTTF^* = 363.785 \cdot 0,9 = 327.400\ km$$

Noto l'*MTTF* obiettivo è possibile applicare ora il metodo descritto nel Capitolo 3 per stimare il costo unitario atteso UEC(tp) sulla base dei valori di β e θ che potrebbero esser utilizzati.

E' bene specificare che il β viene definito dalla teoria come *parametro di forma* e nella pratica può esser tradotto come *parametro di usura*. I calcoli che verranno ora svolti comprenderanno una range di β e θ con i relativi costi unitari attesi che ne deriveranno; questo quindi serve all'officina per capire a grandi linee a che costi si potrebbero andare in contro con quell'*MTTF* di prima ipotesi. Se i costi ottenuti riescono ad esser più competitivi di quelli attualmente sostenuti, occorrerà andare a rivedere quanto calcolato al fine di ottenere con l'esperienza i valori di β e θ effettivi a cui deriveranno i costi effettivamente sostenuti con il nuovo metodo manutentivo.

Per prima cosa occorre stimare i costi di manutenzione preventiva C_p e i costi a guasto C_f che stando alle equazioni precedentemente espresse nel capitolo 3.3:

$$C_p = C_{Ricambio} + (N_{Operatori} \cdot MTTR_{Preventivo} \cdot C_{Operatore})$$

$$C_f = C_{Ricambio} + (N_{Operatori} \cdot MTTR_{Guasto} \cdot C_{Operatore}) + (C_{Fermo} \cdot MTTR_{Guasto})$$

Andiamo pertanto ad assegnare le varie voci di costo:

- $C_{Operatore} = 25\text{€}/h \rightarrow$ È il costo orario di un singolo manutentore
- $N_{Operatori} = 2 \rightarrow$ Tipicamente per questo genere di lavoro occorrono 2 elettricisti
- $MTTR_{Preventivo} = 4h \rightarrow$ Tempo medio tipicamente impiegato per sostituire il convertitore
- $C_{Ricambio} = 30.000\text{€} \rightarrow$ È un dato stimato poiché il prezzo effettivo del convertitore dovrà esser fissato sulla base dei lotti che dovranno esser ordinati a magazzino

Si ottiene quindi che $C_p = 30.000 + (2 \cdot 4 \cdot 25) = 30.200\text{€}/\text{intervento preventivo}$

- $MTTR_{Guasto} = 24h \rightarrow$ Si prende il caso più critico che vede guastarsi il treno sulla linea Rovigo-Verona P.N. dove i tempi di recupero del mezzo possono essere a volte anche più lunghi di un giorno
- $C_{Fermo} \cong 150\text{€}/h$

Per il costo di fermo veicolo è stata fatta una stima sulla base delle seguenti voci:

- Costo del biglietto \rightarrow Fascia chilometrica 80km $\rightarrow 7,45\text{€}$
- Posti a sedere \rightarrow GTW 2/6 $\rightarrow 111$ posti
- Costo orario macchinista $\rightarrow 10\text{€}/h$
- Tempo di condotta per il rientro del veicolo guasto $\rightarrow 6h$
- Costo Autobus sostitutivo per il termine della corsa soppressa $\rightarrow 600\div 700\text{€}$
- Penale imposta per mancato servizio da parte di Trenitalia o dalla Regione $\rightarrow 1000\text{€}$

L'ultima voce inserita è anch'essa una stima di massima poiché dipendono dal tipo di linea su cui stava prestando servizio il treno e dall'orario di effettuazione; i treni sono infatti sub-appaltati a Trenitalia divisione regionale sulla linea *Rovigo-Verona P.N.* e *Rovigo-Chioggia* o sono espressamente richiesti dalla Regione Veneto per quanto riguarda la linea *Adria-Venezia S.L.*

Il costo di fermo viene ottenuto come segue:

- Costo rimborso/mancato servizio = $7,45€ \cdot 111 \text{ posti} = 826,95 €/\text{tratta} \cdot 2(A/R) = 1654€$
- Costo macchinisti = $10€/h \cdot 6h = 60 €/\text{rientro macchina}$

$$C_{Fermo} = \frac{1654€ + 60€ + 700€ + 1000€}{MTTR_{Guasto}} = \frac{3414€}{24h} = 142,25€/h \cong 150€/h$$

Da cui otteniamo il costo di manutenzione a guasto:

$$C_f = 30.000 + (2 \cdot 24 \cdot 25) + (150 \cdot 24) = 34.800€/\text{intervento a guasto}$$

Nota:

Il costo così calcolato non è corretto poiché i manutentori non vengono impiegati per 24h ma solo per il tempo di sostituzione del componente che coincide con l' $MTTR_{Preventivo}$ ovvero pari a 4h di lavoro

$$C_f' = 30.000 + (2 \cdot 4 \cdot 25) + (150 \cdot 24) = 33.800€/\text{intervento a guasto}$$

Dato che C_f e C_p sono stati fissati è possibile andare a valutare per quali valori di β e θ si riscontri l' $MTTF^*$ ipotizzato in precedenza che deve esser però trasformato in ore di lavoro del componente: Stando al “giro macchine” si ricava che di media un veicolo percorre circa 600km/giorno che equivalgono 4.200km/settimana che, moltiplicati per 52 settimane comportano la percorrenza di 218.400km/anno.

Allo stesso modo facendo affidamento ai turni più lunghi coperti da una macchina, si hanno orari di servizio che iniziano alle 3:25 della mattina e terminano alle 22:10 circa della sera, pari a circa 19 ore e 30 minuti di lavoro; tenendo conto di una media di 30 minuti tra la fine e l’inizio di una corsa dove vengono spenti i motori diesel, su un totale di 8 pause nell’arco della giornata, le ore di lavoro continuative possono esser stimate per un totale di 16 h/giorno.

In un anno abbiamo quindi:

- Km di servizio totali = 218.400 km/anno
- Ore di servizio continuative = 5840 h/anno

Dato che $MTTF^* = 327400km$ si ottiene che le ore di lavoro continuative prima di effettuare l'intervento manutentivo sono:

$$Giorni equivalenti = gg_{Eq.} = \frac{MTTF^*}{600km} = 545,6 \text{ giorni}$$

$$Ore di lavoro equivalenti = gg_{Eq.} \cdot 16 \text{ h/giorno} = 8730,6h$$

Pertanto $MTTF^*$ vale 8730,6 ore.

Noto l' $MTTF$ obiettivo nell'unità di misura oraria è possibile andare ad utilizzare il metodo descritto nel paragrafo 3.6.2 e andare a mappare, sulla base dei C_f e C_p , gli $MTTF$ che si ottengono al variare di β e θ :

MTTF*=8730,6h		BETA																				
		1	1,25	1,5	1,75	2	2,25	2,5	2,75	3	3,25	3,5	3,75	4	4,25	4,5	4,75	5	5,25	5,5	5,75	6
THETA	8000	8000	7451,07	7221,962	7124,942	7089,815	7085,844	7098,111	7118,854	7143,836	7170,667	7197,977	7224,977	7251,22	7276,462	7300,586	7323,548	7345,35	7366,023	7385,611	7404,17	7421,755
	8250	8250	7683,916	7447,649	7347,596	7311,372	7307,276	7319,926	7341,318	7367,081	7394,751	7422,914	7450,758	7477,82	7503,852	7528,729	7552,408	7574,892	7596,211	7616,412	7635,55	7653,685
	8500	8500	7916,762	7673,335	7570,251	7532,929	7528,709	7541,742	7563,783	7590,326	7618,834	7647,851	7676,538	7704,421	7731,241	7756,873	7781,269	7804,434	7826,399	7847,212	7866,93	7885,614
	8750	8750	8149,608	7899,021	7792,905	7754,486	7750,141	7763,558	7786,247	7813,571	7842,917	7872,788	7902,319	7931,022	7958,631	7985,016	8010,13	8033,976	8056,587	8078,012	8098,311	8117,544
	9000	8999,999	8382,454	8124,708	8015,56	7976,042	7971,574	7985,374	8008,711	8036,816	8067,001	8097,725	8128,099	8157,622	8186,02	8213,159	8238,991	8263,519	8286,776	8308,813	8329,691	8349,474
	9250	9249,999	8615,3	8350,394	8238,214	8197,599	8193,007	8207,19	8231,175	8260,06	8291,084	8322,661	8353,88	8384,223	8413,409	8441,302	8467,852	8493,061	8516,964	8539,613	8561,071	8581,404
	9500	9499,999	8848,146	8576,08	8460,868	8419,156	8414,439	8429,006	8453,639	8483,305	8515,168	8547,598	8579,661	8610,824	8640,799	8669,446	8696,713	8722,603	8747,152	8770,414	8792,451	8813,334
	9750	9749,998	9080,992	8801,767	8683,523	8640,713	8635,872	8650,822	8676,103	8706,55	8739,251	8772,535	8805,441	8837,424	8868,188	8897,589	8925,574	8952,145	8977,34	9001,214	9023,832	9045,264
	10000	9999,997	9313,838	9027,453	8906,177	8862,269	8857,305	8872,638	8898,568	8929,795	8963,334	8997,472	9031,222	9064,025	9095,578	9125,732	9154,435	9181,687	9207,528	9232,014	9255,212	9277,193

Tabella 4.5.4 - Valori di $MTTF$ per diverse combinazioni di θ e ϑ

E' quindi possibile effettuare un ingrandimento al fine di ottenere il range di β e θ necessari ad ottenere l' $MTTF^*$:

MTTF*=8730,6h		BETA																	
		1	1,25	1,5	1,75	2	2,25	2,5	2,75	3	3,25	3,5	3,75	4	4,25	4,5	4,75	5	
THETA	9500	9499,999	8848,146	8576,08	8460,868	8419,156	8414,439	8429,006	8453,639	8483,305	8515,168	8547,598	8579,661	8610,824	8640,799	8669,446	8696,713	8722,603	
	9550	9549,999	8894,715	8621,218	8505,399	8463,467	8458,726	8473,369	8498,132	8527,954	8559,984	8592,586	8624,817	8656,144	8686,277	8715,074	8742,485	8768,511	
	9600	9599,998	8941,284	8666,355	8549,93	8507,778	8503,012	8517,733	8542,625	8572,603	8604,801	8637,573	8669,973	8701,464	8731,755	8760,703	8788,257	8814,42	
	9650	9649,998	8987,853	8711,492	8594,461	8552,09	8547,299	8562,096	8587,118	8617,252	8649,618	8682,56	8715,129	8746,784	8777,233	8806,332	8834,029	8860,328	
	9700	9699,998	9034,423	8756,629	8638,992	8596,401	8591,585	8606,459	8631,611	8661,901	8694,434	8727,548	8760,285	8792,104	8822,71	8851,96	8879,801	8906,237	
	9750	9749,998	9080,992	8801,767	8683,523	8640,713	8635,872	8650,822	8676,103	8706,55	8739,251	8772,535	8805,441	8837,424	8868,188	8897,589	8925,574	8952,145	

Tabella 4.5.5 - Ingrandimento area $MTTF$ più prossimi a $MTTF^*$

MTTF*=8730,6h		BETA							
		3,25	3,5	3,75	4	4,25	4,5	4,75	5
THETA	9500	8515,168	8547,598	8579,661	8610,824	8640,799	8669,446	8696,713	8722,603
	9550	8559,984	8592,586	8624,817	8656,144	8686,277	8715,074	8742,485	8768,511
	9600	8604,801	8637,573	8669,973	8701,464	8731,755	8760,703	8788,257	8814,42
	9650	8649,618	8682,56	8715,129	8746,784	8777,233	8806,332	8834,029	8860,328
	9700	8694,434	8727,548	8760,285	8792,104	8822,71	8851,96	8879,801	8906,237
	9750	8739,251	8772,535	8805,441	8837,424	8868,188	8897,589	8925,574	8952,145

Tabella 4.1.6 - Raggruppamento dei range di θ e ϑ che consentono di ottenere l' $MTTF$ prossimo a $MTTF^*$

Da cui si ottiene la seguente mappa:

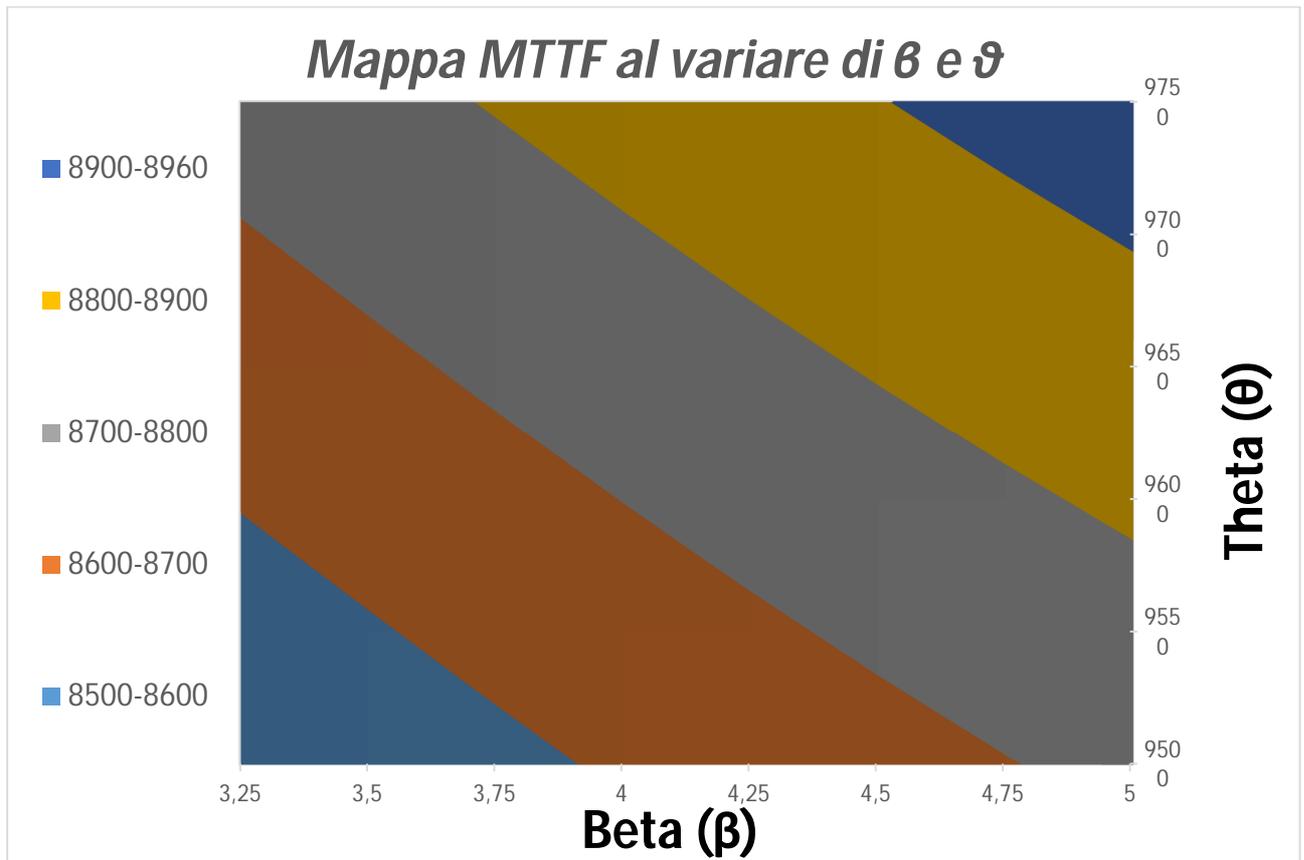


Figura 4.5.7 – Mappa degli MTTF al variare di β e ϑ

Si vanno pertanto a calcolare i valori di t_p che minimizzano il costo ovvero gli $UEC(t_p)$:

Beta (β)	3,25	3,5	3,75	4	4,25	4,5	4,75	5
t_p	16384	15019	14004	13224	12609	12112	11705	11365
$UEC(t_p)$	3,871524 3	3,8712289 3	3,87071589	3,86995105	3,86892217	3,86763387	3,86610186	3,86434810
theta (ϑ)	9739,679 2	9702,7256 4	9666,46634	9631,48294	9598,07083	9566,35549	9536,36185	9508,05619
$UEC(t_p)*\vartheta$	37707,40	37561,472 2	37416,1449 4	37273,3675 6	37134,1890 7	36999,1606 1	36868,5463 3	36742,4389 1

Tabella 4.5.8 – Valori di t_p e $UEC(t_p)$ al variare di β per θ necessario ad ottenere MTTF pari a 8730h

Per render conto del periodo necessario alla sostituzione del convertitore si effettuano le seguenti conversioni:

$$MTTF = 8730h = 8730 \div 16h = 545,625 \text{ giorni di servizio} = 545,625 \cdot 600km = 327.375km$$

Dato che a livello di piano manutentivo si ha una visita tecnica ogni 15.000, 20.000 o 30.000km mentre per altre tipologie di controllo possono esser attesi i 200.000km, basterà scegliere se far coincidere la sostituzione del convertitore tra i 300.000km e i 330.000km a seconda del tipo di usura riscontrata. Dato che questi sono calcoli cautelativi non viene negata la possibilità di posticipare la manutenzione per il tempo necessario a far coincidere il rientro del veicolo con quanto specificato dal giro macchine:

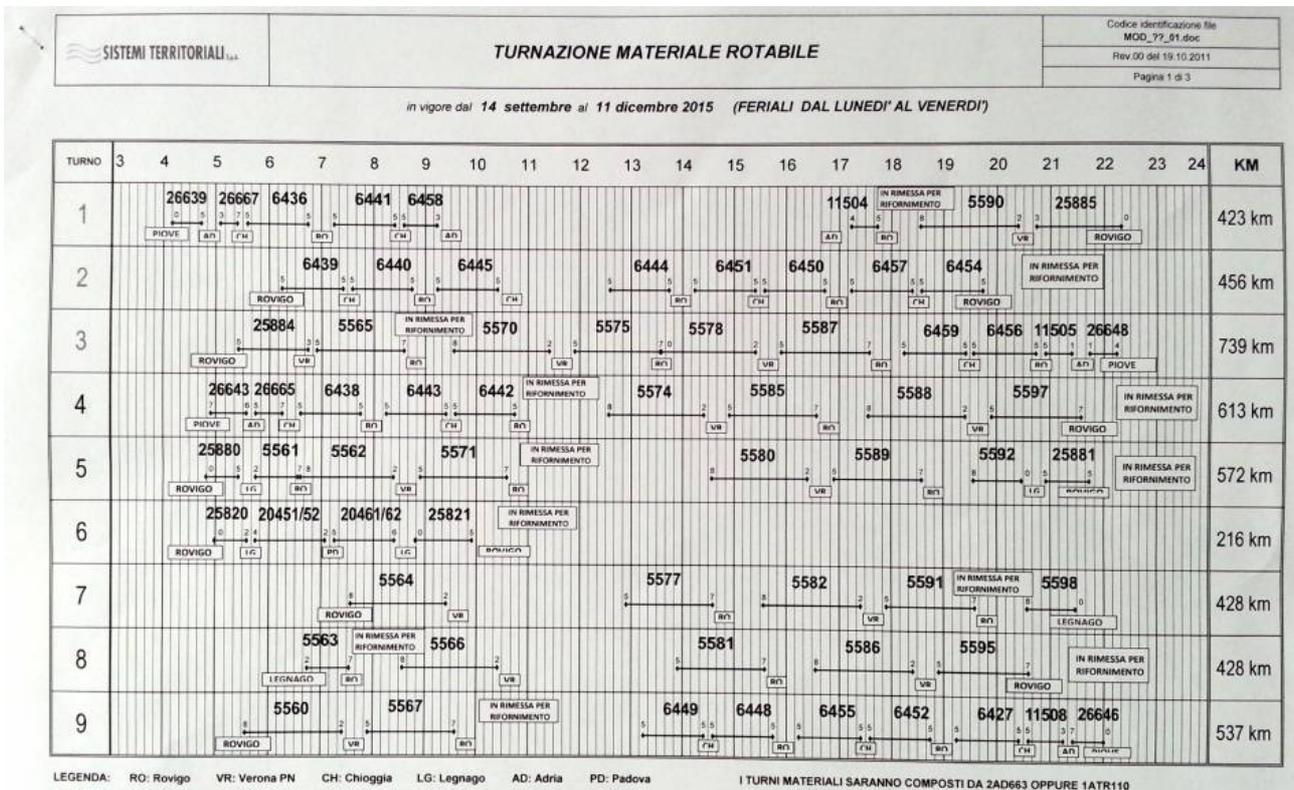


Figura 4.5.9 - Esempio di grafico lineare giro macchine - Turni Feriali

	<h1>TURNAZIONE VEICOLI</h1>	Codice identificazione file MOD_08_05.doc
		Rev.00 del 19.10.2011
		Pagina 1 di 1

Sigg. RAS PC / PdC - RAS PV / PdV - RAS FT AT / PdF / PdA - CUTDO / SMAN
p.c. D. M. di PIOVE DI SACCO e ADRIA

OGGETTO: TURNAZIONE MATERIALE ROTABILE DEPOSITO DI ROVIGO - DAL LUNEDI' AL VENERDI' (FERIALI) -

- in vigore da lunedì 14 SETTEMBRE a venerdì 11 DICEMBRE 2015

Turni numero:	Chilometri:
1) 1AD Tr. n° 26639-26667-6436-6458-11504-5590-25885.	423
2) 1AD Tr. n° 6439-6440-6445-6444-6451-6450-6457-6454.	456
3) 1AD Tr. n° 25884-5565-5570-5575-5578-5587-6459-6456-11505-26648.	739
4) 2AD/ATR 110 Tr. n° 26643-26665-6438-6443-6442-5574-5585-5588-5597.	613
5) 2AD/ATR 110 Tr. n° 25880-5561-5562-5571-5580-5589-5592-25881.	572
6) 2AD/ATR 110 Tr. n° 25820-20451/52-20461/62-25821.	216
7) 2AD/ATR 110 Tr. n° 5564-5577-5582-5591-5598.	428
8) 2AD/ATR 110 Tr. n° 5563-5566-5581-5586-5595.	428
9) 2AD/ATR 110 Tr. n° 5560-5567-6449-6448-6455-6452-6427-11508-26646.	537

*Figura 4.5.10 – Esempio di turnazione veicoli con indicazione della tipologia di veicolo:
AD=Automotrice Diesel Aln663 o Aln668
ATR110=GTW 2/6*

Trama manutentiva degli interventi ST / GTW DMU 4/12 / ATR 126 001-003

Numero TASK	RFI	Elemento	Ordine di lavoro	Caratteristica del controllo	SC	Intervallo di potenza	Intervallo temporale	Influenza	N. documento	Documenti associati
QD0109.241	RG	Serbatoi ad aria compressa	Verificare lo stato inclusa la verifica della pressione. Campione: smontare annualmente 1% dei contenitori ad aria compressa	<ul style="list-style-type: none"> • Assenza di corrosioni • Assenza di crepe • Assenza di danneggiamenti • Verifica della pressione come da linee guida 		-	7.200 d	S	<ul style="list-style-type: none"> • 87/404/EWG • DIN EN 286-4 	<ul style="list-style-type: none"> • 87/404/CEE - Contenitore ad aria compressa semplice • DIN EN 286-4 - Contenitore a pressione nei veicoli rotabili, Allegati G4
RA0015.241	RG	Sistema di frenatura / comando di frenatura	Eseguire la manutenzione di sistema	• Sistema di frenatura pronto all'uso		300.000 km	720 d	S	• xxx	• KNORR - Istruzioni di manutenzione del sistema
RA0018.241	RG	Sistema di frenatura / comando di frenatura	Eseguire la revisione	• Sistema di frenatura pronto all'uso		600.000 km	1.440 d	S	• xxx	• KNORR - Istruzioni di manutenzione del sistema
RA0021.241	RG	Sistema di frenatura / comando di frenatura	Eseguire la revisione	• Sistema di frenatura pronto all'uso		1.200.000 km	2.880 d	S	• xxx	• KNORR - Istruzioni di manutenzione del sistema
RB1306.241	RG	Unità pinza freno / Carrello portante	Verificare lo stato delle pinze del freno	<ul style="list-style-type: none"> • Nessun fissaggio lento! • Assenza di danneggiamenti • Assenza di corrosioni 		300.000 km	720 d	S	• -	• -
RB1336.241	RG	Unità pinza freno / carrello motore	Verificare lo stato delle pinze del freno	<ul style="list-style-type: none"> • Nessun fissaggio lento! • Assenza di danneggiamenti • Assenza di corrosioni 		300.000 km	720 d	S	• -	• -
SA0102.241	RG	Cuscinetto del giunto	Verificare lo stato delle aree gommate	<ul style="list-style-type: none"> • Assenza di distacco tra gomma e metallo • Assenza di crepe 		-	2.160 d	S	• -	• -
SA0103.241	RG	Cuscinetto del giunto	Sostituire il cuscinetto del giunto	• -		-	2.160 d	S	• -	• -
SB0186.241	RG	Accoppiamento dell'aria	Sostituire l'anello di tenuta	• Attacco aria a tenuta stagna		-	720 d	S	<ul style="list-style-type: none"> • 1.010.579 • 1.010.580 	<ul style="list-style-type: none"> • SCHAKU- Manuale • SCHAKU- Manuale

Figura 4.5.11 – Esempio di Trama manutentiva degli interventi per GTW 4/12 ATR 126

A conclusione dello studio sulla sostituzione del convertitore vengono generate le tabelle come indicato nel capitolo 3.6.4 per la stima degli $UEC(t_p)$ al variare di β ; viene pertanto in primo momento ripresa la tabella 4.5.8 dove vengono calcolati, a parità di $MTTF$ fissato a 8730h, i valori di θ , t_p e $UEC(t_p)$ al variare di β :

		BETA							
		3,25	3,5	3,75	4	4,25	4,5	4,75	5
MTTF=8730 Cp=1700 Cf=5300	theta (θ)	9739,979	9702,726	9666,466	9631,483	9598,071	9566,355	9536,362	9508,056
	tp	16384	15019	14004	13224	12609	12112	11705	11365
	UEC(tp)	3,8715243	3,8712289	3,8707159	3,8699510	3,8689221	3,8676338	3,8661018	3,864348
	UEC(tp)θ	4038,22868	3889,17852	3757,71901	3641,06953	3537,01079	3443,70228	3359,61925	3283,496

Tabella 4.5.12 – Calcolo di θ , t_p e $UEC(t_p)$ al variare di β per $MTTF$ pari a 8730h

È quindi possibile calcolare la variazione dei costi unitari attesi nel caso in cui dovesse esser adottato un β diverso da quello calcolato detto β^* ovvero l' $UEC(t_p^*)$ dove t_p^* è il tempo di manutenzione preventiva ottenuto al β^* . In questo modo è possibile avere un'idea dei costi che potrebbero esser sostenuti dato che l'usura β è un fattore che deve esser ipotizzato in un primo momento ed affinato poi con l'esperienza in base all'effettivo uso del componente:

MTTF=8730	UEC(tp*)		3,25	3,5	3,75	4	4,25	4,5	4,75	5
	θ	tp	16384	15019	14004	13224	12609	12112	11705	11365
3,25	9739,979	16384	3,87152432	3,87215366	3,87511161	3,88136391	3,89090127	3,90317363	3,91735662	3,93279416
3,5	9702,726	15019	3,87149391	3,87122893	3,8719686	3,87496188	3,88076193	3,88925291	3,89988476	3,91209858
3,75	9666,466	14004	3,87158627	3,87111659	3,8707159	3,87151432	3,87442716	3,87975557	3,88726811	3,89655927
4	9598,071	13224	3,87165787	3,87127661	3,87046313	3,86995105	3,87076442	3,87353818	3,878368	3,88504374
4,25	9598,071	12609	3,87169163	3,87146171	3,87065299	3,86950983	3,86892217	3,8697239	3,87230748	3,87668126
4,5	9566,355	12112	3,87170318	3,87159094	3,87096842	3,86966537	3,8682632	3,86763388	3,86839995	3,87078925
4,75	9536,362	11705	3,87170613	3,87166072	3,87125585	3,87007493	3,86831863	3,86674171	3,86610186	3,86682417
5	9508,056	11365	3,8717066	3,8716914	3,8714626	3,8705334	3,8687538	3,8666418	3,8649805	3,8643481

Tabella 4.5.13 – Valori degli $UEC(tp^*)$ al variare di β per θ costante

Per comprendere al meglio l'influenza del β a parità di θ si effettua il prodotto degli $UEC(t_p^*)$ per il θ di riferimento:

MTTF=8730	UEC(tp*) θ		3,25	3,5	3,75	4	4,25	4,5	4,75	5
	θ	tp	16384	15019	14004	13224	12609	12112	11705	11365
3,25	9739,979	16384	37707,40	37713,53	37742,34	37803,24	37896,13	38015,66	38153,80	38304,15
3,5	9702,726	15019	37564,04	37561,47	37568,65	37597,69	37653,97	37736,35	37839,51	37958,02
3,75	9666,466	14004	37424,56	37420,02	37416,14	37423,86	37452,02	37503,53	37576,15	37665,96
4	9598,071	13224	37289,81	37286,13	37278,30	37273,37	37281,20	37307,92	37354,44	37418,73
4,25	9598,071	12609	37160,77	37158,56	37150,80	37139,83	37134,19	37141,88	37166,68	37208,66
4,5	9566,355	12112	37038,09	37037,02	37031,06	37018,59	37005,18	36999,16	37006,49	37029,35
4,75	9536,362	11705	36921,99	36921,56	36917,70	36906,43	36889,69	36874,65	36868,55	36875,43
5	9508,056	11365	36812,40	36812,26	36810,08	36801,25	36784,33	36764,25	36748,45	36742,44

Tabella 4.5.14 – Valori degli UEC(tp*) moltiplicati per il θ di riferimento

Per concludere si riportano tramite la medesima tabella le differenze di costo che implicherebbero la scelta di un β rispetto ad un altro ovvero l'errore di calcolo che si andrebbe ad ottenere se il β di prima ipotesi (di riga) non fosse corretto e quindi pari a β^* (di colonna):

MTTF=8730	$\Delta UEC(tp^*)\theta$		3,25	3,5	3,75	4	4,25	4,5	4,75	5
	θ	tp	16384	15019	14004	13224	12609	12112	11705	11365
3,25	9739,979	16384	0	6,130	34,939	95,835	188,725	308,254	446,392	596,749
3,5	9702,726	15019	2,571	0	7,177	36,220	92,496	174,882	278,040	396,547
3,75	9666,466	14004	8,413	3,873	0	7,718	35,875	87,382	160,001	249,814
4	9598,071	13224	16,439	12,767	4,932	0	7,834	34,549	81,068	145,365
4,25	9598,071	12609	26,581	24,375	16,613	5,640	0	7,695	32,492	74,472
4,5	9566,355	12112	38,928	37,855	31,899	19,434	6,020	0	7,329	30,185
4,75	9536,362	11705	53,444	53,011	49,150	37,889	21,140	6,102	0	6,888
5	9508,056	11365	69,966	69,821	67,645	58,810	41,890	21,809	6,013	0

Tabella 4.5.15 – Valori di $\Delta UEC(tp^*)$ al variare di θ^*

Come si può vedere i valori alla destra e alla sinistra delle caselle pivot $UEC(t_p)$ sono positivi poiché i valori pivot corrispondono all'apice della curva dei costi unitari attesi e pertanto al costo minimo che può esser ottenuto per quella condizione.

Allo stesso modo del precedente si propone un prospetto del rapporto tra costo unitario atteso minimo e costo unitario atteso per β^* :

$$\%UEC = \frac{UEC(t_p)}{UEC(t_p^*)} \rightarrow \frac{f(\beta)}{f(\beta^*)}$$

MTTF=8730	UEC(tp)θ / UEC(tp*)θ		3,25	3,5	3,75	4	4,25	4,5	4,75	5
	θ	tp	16384	15019	14004	13224	12609	12112	11705	11365
3,25	9739,97	16384	1	0,9998374	0,9990742	0,9974649	0,9950199	0,9918913	0,9883002	0,9844207
3,5	9702,72	15019	0,9999315	1	0,9998089	0,9990366	0,9975435	0,9953657	0,9926521	0,9895530
3,75	9666,46	14004	0,9997751	0,9998964	1	0,9997937	0,9990421	0,9976700	0,9957419	0,9933676
4	9598,07	13224	0,9995591	0,9996575	0,9998677	1	0,9997898	0,9990739	0,9978297	0,9961151
4,25	9598,07	12609	0,9992846	0,9993440	0,9995528	0,9998481	1	0,9997928	0,9991257	0,9979985
4,5	9566,35	12112	0,9989489	0,9989779	0,9991385	0,9994750	0,9998373	1	0,9998019	0,9991848
4,75	9536,36	11705	0,9985525	0,9985642	0,9986686	0,9989733	0,9994269	0,9998345	1	0,9998132
5	9508,05	11365	0,9980994	0,9981033	0,9981623	0,9984019	0,9988612	0,9994067	0,9998363	1

Tabella 4.5.16 – Rapporto tra UEC(tp) ottimo (minimo) e UEC(tp*)

4.6 Analisi di manutenzione preventiva per valvola freno pneumatica

In questo caso studio andiamo ad analizzare i guasti che vengono riscontrati alla valvola pneumatica del freno collocata nei quadri PTM (modulo di trazione) e PTF (quadro pneumatico riposto all'estremità destra delle porte di accesso di ciascuna semicassa).

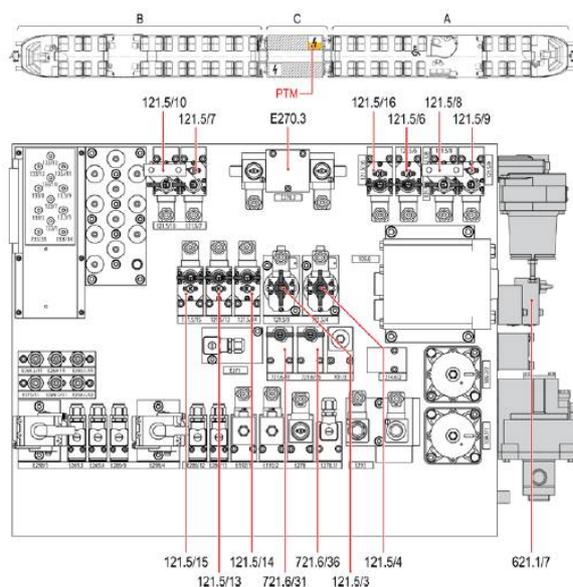


Figura 4.6.1 – Quadro pneumatico PTM riposto in un apposito armadio dedicato all'interno del modulo di trazione

Sigla	Descrizione
121.5/3	Freno asse motore 3
121.5/4	Freno asse motore 4
121.5/16	Pressione di comando freno carrello portante cassa B, assi 5+6
121.5/6	Pressione di comando freno carrello portante cassa A, assi 1+2
121.5/7+10	Distributore carrelli portanti casse A e B
121.5/8+9	Distributore carrello motore
121.5/15	Freno a molla asse motore 3
121.5/13	Freno a molla asse motore 4
121.5/14	Freno a molla carrello portante cassa B, asse 5
721.6/31	Sabbiera assi motori 3 e 4
721.6/36	Sospensione pneumatica carrello motore
E270.3	Valvola a impulsi freno a molla
621.1/7	Rubinetto di alimentazione CG-CP

Tabella 4.6.2 – Componenti quadro pneumatico PTM

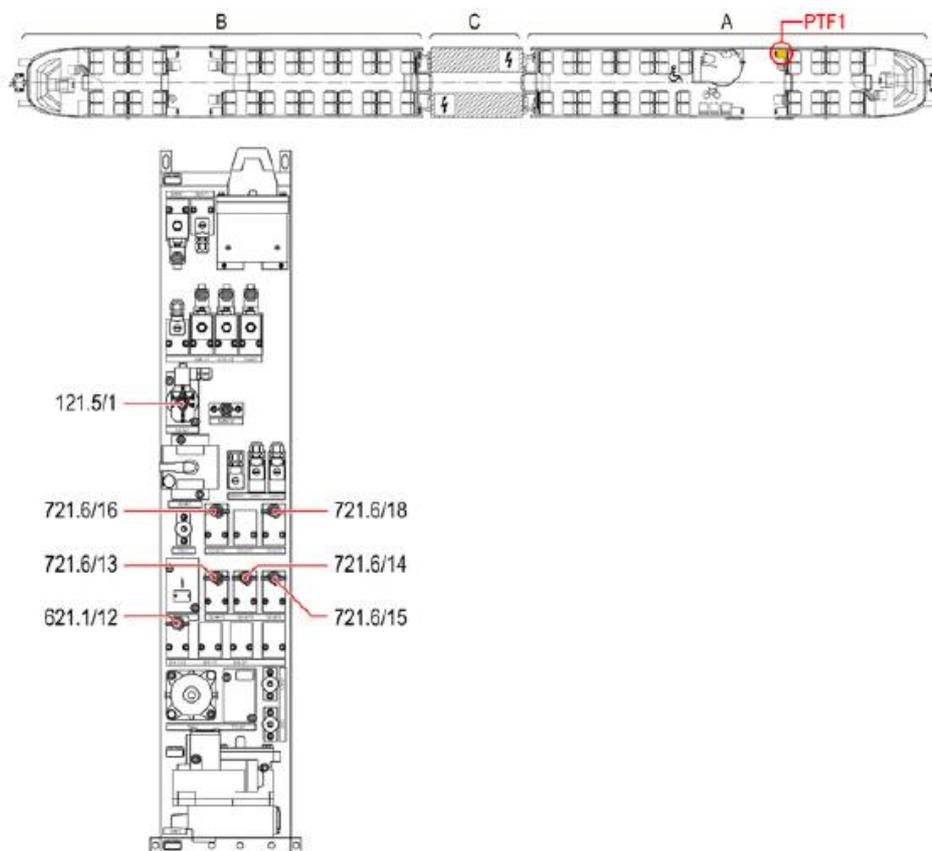


Figura 4.6.3 – Quadro pneumatico PTF1 allocato nella semicassa riferita alla cabina A

Sigla	Descrizione
121.5/1	Freno carrello portante cassa A, assi 1+2
621.1/12	Rubinetto di alimentazione CG-CP
721.6/13	Accoppiamento frontale cassa A
721.6/14	Typhon 370 Hz e 660 Hz – cassa A (valvole trombe toni alti e toni bassi)
721.6/15	Ungibordi asse portante 1 – cassa A
721.6/16	Sospensione pneumatica carrello portante cassa A
721.6/18	Ritirata

Tabella 4.6.4 – Componenti quadro pneumatico PTF1

Di per sé il componente non né particolarmente complesso né tantomeno costoso ma, in caso di guasto, comporta il fermo del veicolo poiché, essendo progettato ai fini del mantenimento della sicurezza, la sua condizione di riposo è quella che comanda la frenatura degli assi su cui aziona i dispositivi del freno.

La rottura della valvola 121.5/x comporta quindi l'impossibilità di effettuare la sfrenatura e pertanto la movimentazione del mezzo in servizio.

Il problema può essere provvisoriamente risolto andando ad isolare pneumaticamente tale apparato ma, essendo inibita una parte frenante del treno, sarà possibile viaggiare in condizioni di degrado che consentono il solo rientro in officina del mezzo.

Come fatto nel paragrafo precedente per il convertitore di potenza IGBT si sono raccolti i dati inerenti ai guasti riscontrati per la valvola in esame, con l'unica differenza che in questo caso si inseriranno direttamente le ore di lavoro:

<i>Veicolo ATR</i>	<i>Valvola</i>	Guasto 1	Guasto 2	Guasto 3	Guasto 4	Guasto 5	Guasto 6	Guasto 7	Guasto 8	Guasto 9	Guasto 10
<i>110 201</i>	<i>PTM</i>	7.240			16.140			24.720			33.140
	<i>PTF1</i>			9.160			23.922		25.150		
	<i>PTF2</i>		8.650			16.200				31.010	
<i>110 202</i>	<i>PTM</i>	8.900				19.580		26.410			34.090
	<i>PTF1</i>		9.160		18.460				30.860		
	<i>PTF2</i>			10.400			19.900			30.940	
<i>116 001</i>	<i>PTM</i>	8.000			12.500			19.940	25.430		
	<i>PTF1</i>		10.020				19.510				30.680
	<i>PTF2</i>			10.500		16.970				25.980	

Tabella 4.6.5 – Cadenze orarie dei guasti riscontrati per le valvole pneumatiche del freno

Come si può vedere, a titolo puramente semplificato, si sono valutati esclusivamente i guasti dei soli veicoli GTW 2/6 poiché nel caso dei 4 casse (GTW 4/12) alcuni dati sarebbero risultati praticamente doppi in quanto la struttura del treno è di tipo simmetrico e le modalità di funzionamento per i due semitreni è identico.

Si riporta pertanto la seconda tabella riassuntiva delle singole differenze tra un guasto ed un altro alla stessa tipologia di valvola:

Veicolo ATR	Valvola	$\Delta 1$	$\Delta 2$	$\Delta 3$	$\Delta 4$	Media
110 201	PTM	7.240	8.900	8.580	8.420	8.285
	PTF1	9.160	14.762	1.228		8.383
	PTF2	8.650	7.550	14.810		10.337
110 202	PTM	8.900	10.680	6.830	7.680	8.523
	PTF1	9.160	9.300	12.400		10.287
	PTF2	10.400	9.500	11.040		10.313
116 001	PTM	8.000	4.500	7.440	5.490	6.358
	PTF1	10.020	9.490	11.170		10.227
	PTF2	10.500	6.470	9.010		8.660

Tabella 4.6.6 – Differenze temporali tra un guasto e quello successivo della stessa valvola pneumatica

Grazie alla tabella 4.15 è possibile apprezzare che, mediamente, la valvola **PTM** è quella più soggetta a “stress”. Questa affermazione viene confermata dal fatto che, essendo posizionata all’interno del modulo di trazione, è sottoposta a temperature di esercizio notevolmente più elevate rispetto a quelle riposte nei quadri pneumatici **PTF1** e **PTF2**.

L’MTTF che si andrà ad utilizzare per il calcolo dei costi unitari attesi $UEC(t_p)$ può esser stimato con ampio margine di sicurezza andando a calcolare la media dei valori medi Δt ottenuti per la valvola **PTM**:

$$MTTF^* = \frac{PTM_{110.201} + PTM_{110.202} + PTM_{116.001}}{3} = \frac{8.285 + 8.523 + 6.358}{3} = 7.722h$$

Si ripetono a questo punto i medesimi passaggi effettuati in precedenza.

Per prima cosa andiamo a stimare i costi che si avrebbero nelle due principali tipologie manutentive ovvero C_p e C_f riferiti rispettivamente al caso di manutenzione preventiva e a guasto:

$$C_p = C_{Ricambio} + (N_{Operatori} \cdot MTTR_{Preventivo} \cdot C_{Operatore})$$

$$C_f = C_{Ricambio} + (N_{Operatori} \cdot MTTR_{Guasto} \cdot C_{Operatore}) + (C_{Fermo} \cdot MTTR_{Guasto})$$

Dove anche in questo caso le varie voci di costo valgono:

- $C_{Operatore} = 25€/h$ → È il costo orario di un singolo manutentore.
- $N_{Operatori} = 1$ → Nel caso della sostituzione della valvola basta un solo meccanico.
- $MTTR_{Preventivo} = 1h$ → Tempo medio tipicamente impiegato per sostituire il convertitore
- $C_{Ricambio} = 2500€$ → Anche in questo caso il costo della valvola viene stimato sul range dei 2000 ÷ 3000€ poiché essendo un componente di sicurezza il costo reale è imputato ai vari test e verifiche cui deve esser sottoposto per ottenere la certificazione necessaria ad esser impiegato in ambito ferroviario. Tale costo varia inoltre poiché dipendente dalla tipologia di intervento ovvero se di revisione o se di sostituzione con un componente nuovo e, dal lotto in considerazione.

Si ottiene quindi che $C_p = 2500 + (1 \cdot 1 \cdot 25) = 2525€/intervento preventivo$

- $MTTR_{Guasto} = 24h$ → Si prende il caso più critico che vede guastarsi il treno sulla linea Rovigo-Verona P.N. dove i tempi di recupero del mezzo possono essere a volte anche più lunghi di un giorno
- $C_{Fermo} \cong 150€/h$

Per il costo di fermo veicolo è stata fatta una stima sulla base delle seguenti voci:

- Costo del biglietto → Fascia chilometrica 80km → 7,45€
- Posti a sedere → GTW 2/6 → 111 posti
- Costo orario macchinista → 10€/h
- Tempo di condotta per il rientro del veicolo guasto → 6h
- Costo Autobus sostitutivo per il termine della corsa soppressa → 600÷700€
- Penale imposta per mancato servizio da parte di Trenitalia o dalla Regione → 1000€

Da cui si ricava

- Costo rimborso/mancato servizio = $7,45€ \cdot 111 \text{ posti} = 826,95 €/tratta \cdot 2(A/R) = 1654€$
- Costo macchinisti = $10€/h \cdot 6h = 60 €/rientro macchina$

$$C_{Fermo} = \frac{1654€ + 60€ + 700€ + 1000€}{MTTR_{Guasto}} = \frac{3414€}{24h} = 142,25€/h \cong 150€/h$$

Da cui otteniamo il costo di manutenzione a guasto:

$$C_f = 2500 + (1 \cdot 24 \cdot 25) + (150 \cdot 24) = 6700\text{€/intervento a guasto}$$

Nota:

Il costo così calcolato non è corretto poiché i manutentori non vengono impiegati per 24h ma solo per il tempo di sostituzione del componente che coincide con l' $MTTR_{Preventivo}$ ovvero pari a 1h di lavoro

$$C_f' = 2500 + (1 \cdot 1 \cdot 25) + (150 \cdot 24) = 6125\text{€/intervento a guasto}$$

Andiamo pertanto a mappare, sulla base dei C_f e C_p , gli MTTF che si ottengono al variare di β e θ :

MTTF*=7722h		BETA																				
		1	1,25	1,5	1,75	2	2,25	2,5	2,75	3	3,25	3,5	3,75	4	4,25	4,5	4,75	5	5,25	5,5	5,75	6
THETA	8000	8000	7451,07	7221,962	7124,942	7089,815	7085,844	7098,111	7118,854	7143,836	7170,667	7197,977	7224,977	7251,22	7276,462	7300,586	7323,548	7345,35	7366,023	7385,611	7404,17	7421,755
	8250	8250	7683,916	7447,649	7347,596	7311,372	7307,276	7319,926	7341,318	7367,081	7394,751	7422,914	7450,758	7477,82	7503,852	7528,729	7552,408	7574,892	7596,211	7616,412	7635,55	7653,685
	8500	8500	7916,762	7673,335	7570,251	7532,929	7528,709	7541,742	7563,783	7590,326	7618,834	7647,851	7676,538	7704,421	7731,241	7756,873	7781,269	7804,434	7826,399	7847,212	7866,93	7885,614
	8750	8750	8149,608	7899,021	7792,905	7754,486	7750,141	7763,558	7786,247	7813,571	7842,917	7872,788	7902,319	7931,022	7958,631	7985,016	8010,13	8033,976	8056,587	8078,012	8098,311	8117,544
9000	8999,999	8382,454	8124,708	8015,56	7976,042	7971,574	7985,374	8008,711	8036,816	8067,001	8097,725	8128,099	8157,622	8186,02	8213,159	8238,991	8263,519	8286,776	8308,813	8329,691	8349,474	

Tabella 4.27 - Valori di MTTF per diverse combinazioni di β e θ

Noto il range di β e θ che racchiudono l'MTTF obiettivo si effettua un ingrandimento per aumentare la risoluzione della mappa:

MTTF*=7722h		BETA																
		1	1,25	1,5	1,75	2	2,25	2,5	2,75	3	3,25	3,5	3,75	4	4,25	4,5	4,75	5
THETA	8500	8500	7916,762	7673,335	7570,251	7532,929	7528,709	7541,742	7563,783	7590,326	7618,834	7647,851	7676,538	7704,421	7731,241	7756,873	7781,269	7804,434
	8550	8550	7963,331	7718,472	7614,782	7577,24	7572,995	7586,106	7608,275	7634,975	7663,651	7692,838	7721,694	7749,741	7776,719	7802,501	7827,041	7850,343
	8600	8600	8009,9	7763,61	7659,313	7621,552	7617,282	7630,469	7652,768	7679,624	7708,467	7737,826	7766,851	7795,061	7822,197	7848,13	7872,814	7896,251
	8650	8650	8056,47	7808,747	7703,843	7665,863	7661,568	7674,832	7697,261	7724,273	7753,284	7782,813	7812,007	7840,381	7867,675	7893,759	7918,586	7942,16
	8700	8700	8103,039	7853,884	7748,374	7710,174	7705,855	7719,195	7741,754	7768,922	7798,101	7827,8	7857,163	7885,702	7913,153	7939,387	7964,358	7988,068
	8750	8750	8149,608	7899,021	7792,905	7754,486	7750,141	7763,558	7786,247	7813,571	7842,917	7872,788	7902,319	7931,022	7958,631	7985,016	8010,13	8033,976

Tabella 4.6.8 - Ingrandimento area MTTF più prossimi a MTTF*

MTTF*=7722h		BETA								
		2,25	2,5	2,75	3	3,25	3,5	3,75	4	4,25
THETA	8500	7528,70	7541,74	7563,78	7590,32	7618,83	7647,85	7676,53	7704,42	7731,24
	8550	7572,99	7586,10	7608,27	7634,97	7663,65	7692,83	7721,69	7749,74	7776,71
	8600	7617,28	7630,46	7652,76	7679,62	7708,46	7737,82	7766,85	7795,06	7822,19
	8650	7661,56	7674,83	7697,26	7724,27	7753,28	7782,81	7812,00	7840,38	7867,67
	8700	7705,85	7719,19	7741,75	7768,92	7798,10	7827,8	7857,16	7885,70	7913,15
	8750	7750,14	7763,55	7786,24	7813,57	7842,91	7872,78	7902,31	7931,02	7958,63

Tabella 4.6.9 - Raggruppamento dei range di β e θ che consentono di ottenere l'MTTF prossimo a MTTF*

Da cui si ottiene la seguente mappa:

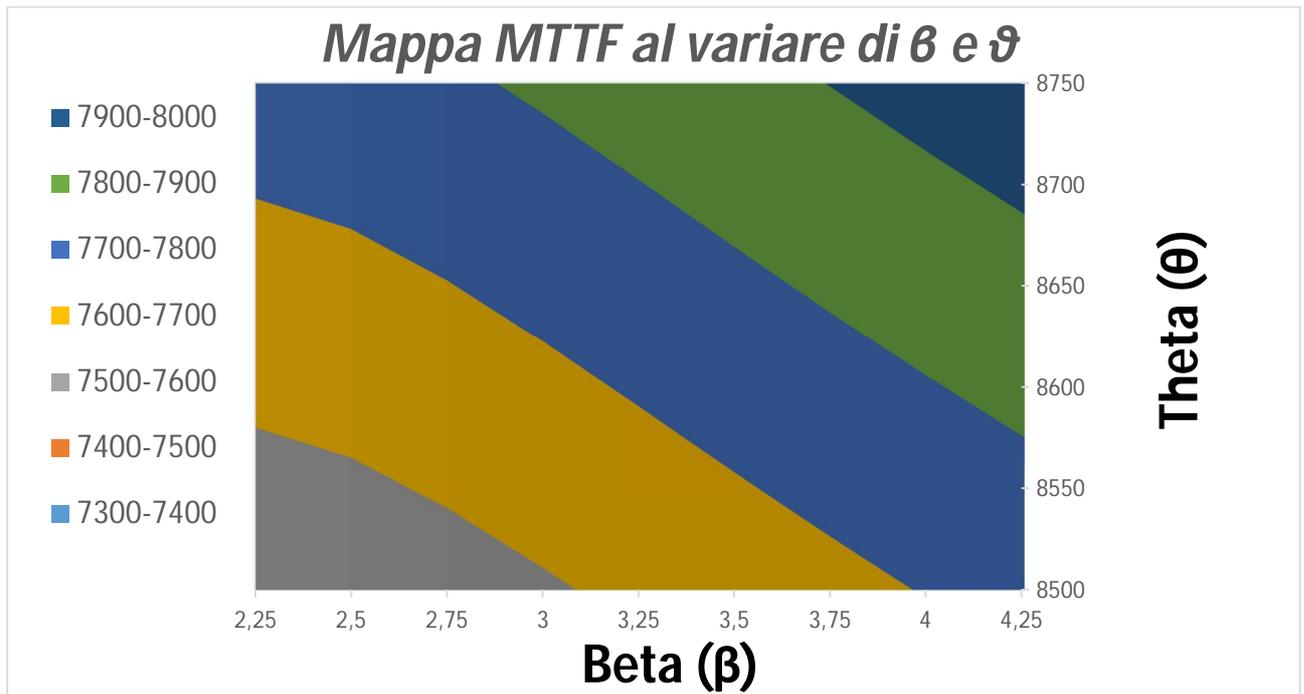


Figura 4.6.10 - Mappa degli MTTF al variare di β e ϑ

Si vanno pertanto a calcolare i valori di t_p che minimizzano il costo ovvero gli $UEC(t_p)$:

Beta (β)	2,25	2,5	2,75	3	3,25	3,5	3,75	4	4,25
t_p	7012	6596	6346	6188	6087	6022	5982	5958	5947
$UEC(t_p)$	0,70763	0,682367	0,659674	0,639466	0,621493	0,605473	0,5911438	0,57827051	0,566654186
theta (ϑ)	8718,227	8703,1611	8677,8010	8647,4548	8615,0976	8582,4109	8550,3382	8519,394	8489,8399
$UEC(t_p)*\vartheta$	6169,305	5938,7527	5724,5264	5529,7597	5354,2261	5196,4253	5054,4800	4926,5144	4810,8033

Tabella 4.6.11 - Valori di t_p e $UEC(t_p)$ al variare di β per ϑ necessario ad ottenere MTTF pari a 7722h

Riprendendo quanto effettuato nel capitolo 4.5 per il convertitore IGBT andiamo a calcolare la variazione dei costi unitari attesi nel caso in cui dovesse essere adottato un β diverso da quello calcolato (β^*) ovvero l' $UEC(t_p^*)$ dove t_p^* è il tempo di manutenzione preventiva ottenuto al β^* :

		BETA								
		2,25	2,5	2,75	3	3,25	3,5	3,75	4	4,25
MTTF=7722 Cp=2525 Cf=6125	theta (ϑ)	8718,228	8703,161	8677,801	8647,455	8615,098	8582,411	8550,338	8519,394	8489,84
	t_p	7012	6596	6346	6188	6087	6022	5982	5958	5947
	$UEC(t_p)$	0,70763	0,68236	0,65967	0,63946	0,62149	0,60547	0,59114	0,57827	0,56665
	$UEC(t_p)*\vartheta$	6169,305	5938,752	5724,526	5529,759	5354,226	5196,425	5054,480	4926,514	4810,803

Tabella 4.6.12 - Calcolo di ϑ , t_p e $UEC(t_p)$ al variare di β per MTTF pari a 7722h

Si vanno a riportare quindi le tabelle relative ai costi unitari attesi e successive combinazioni:

MTTF=772 2	UEC(tp)		2,25	2,5	2,75	3	3,25	3,5	3,75	4	4,25
	θ	tp	7012	6596	6346	6188	6087	6022	5982	5958	5947
2,25	8718,228	7012	0,7076	0,7087	0,7106	0,7123	0,7137	0,7147	0,7153	0,7157	0,7159
2,5	8703,161	6596	0,6837	0,6824	0,6829	0,6838	0,6847	0,6854	0,6859	0,6862	0,6863
2,75	8677,801	6346	0,6637	0,6603	0,6597	0,6599	0,6604	0,6608	0,6612	0,6614	0,6615
3	8647,455	6188	0,6468	0,6414	0,6398	0,6395	0,6396	0,6398	0,6400	0,6402	0,6402
3,25	8615,098	6087	0,6322	0,6250	0,6224	0,6216	0,6215	0,6216	0,6217	0,6217	0,6218
3,5	8582,411	6022	0,6193	0,6105	0,6071	0,6059	0,6055	0,6055	0,6055	0,6055	0,6056
3,75	8550,338	5982	0,6079	0,5975	0,5935	0,5919	0,5913	0,5912	0,5911	0,5912	0,5912
4	8519,394	5958	0,5976	0,5858	0,5811	0,5793	0,5786	0,5784	0,5783	0,5783	0,5783
4,25	8489,84	5947	0,5882	0,5751	0,5700	0,5679	0,5671	0,5668	0,5667	0,5667	0,5667

Tabella 4.6.13 - Valori degli UEC(tp*) al variare di θ per ϑ costante

MTTF=7722	UEC(tp)* ϑ		2,25	2,5	2,75	3	3,25	3,5	3,75	4	4,25
	θ	tp	7012	6596	6346	6188	6087	6022	5982	5958	5947
2,25	8718,228	7012	6169,31	6178,85	6195,15	6210,27	6222,10	6230,67	6236,33	6239,87	6241,53
2,5	8703,161	6596	5950,00	5938,75	5943,44	5951,63	5959,22	5965,13	5969,19	5971,79	5973,01
2,75	8677,801	6346	5759,84	5729,94	5724,53	5726,85	5730,90	5734,64	5737,40	5739,22	5740,10
3	8647,455	6188	5593,40	5546,63	5532,42	5529,76	5530,89	5532,85	5534,56	5535,77	5536,38
3,25	8615,098	6087	5446,37	5384,26	5362,36	5355,50	5354,23	5354,76	5355,64	5356,37	5356,75
3,5	8582,411	6022	5315,32	5239,23	5210,63	5200,25	5197,02	5196,43	5196,66	5197,02	5197,24
3,75	8550,338	5982	5197,59	5108,71	5074,28	5060,98	5056,20	5054,73	5054,48	5054,57	5054,67
4	8519,394	5958	5091,04	4990,45	4950,97	4935,28	4929,30	4927,20	4926,61	4926,51	4926,54
4,25	8489,84	5947	4993,96	4882,65	4838,83	4821,23	4814,37	4811,83	4811,03	4810,83	4810,80

Tabella 4.6.14 - Valori degli UEC(tp*) moltiplicati per il ϑ di riferimento

MTTF=7722	$\Delta UEC(tp)^* \vartheta$		2,25	2,5	2,75	3	3,25	3,5	3,75	4	4,25
	θ	tp	7012	6596	6346	6188	6087	6022	5982	5958	5947
2,25	8718,228	7012	0,000	9,545	25,841	40,963	52,795	61,363	67,022	70,563	72,223
2,5	8703,161	6596	11,242	0,000	4,684	12,877	20,464	26,380	30,440	33,033	34,261
2,75	8677,801	6346	35,314	5,409	0,000	2,320	6,375	10,113	12,871	14,697	15,578
3	8647,455	6188	63,644	16,867	2,656	0,000	1,128	3,092	4,800	6,013	6,616
3,25	8615,098	6087	92,140	30,030	8,133	1,277	0,000	0,534	1,410	2,140	2,526
3,5	8582,411	6022	118,899	42,804	14,202	3,824	0,596	0,000	0,230	0,591	0,812
3,75	8550,338	5982	143,113	54,231	19,796	6,495	1,715	0,253	0,000	0,090	0,192
4	8519,394	5958	164,527	63,937	24,452	8,764	2,786	0,687	0,095	0,000	0,023
4,25	8489,84	5947	183,160	71,846	28,022	10,425	3,563	1,032	0,226	0,023	0,000

Tabella 4.6.15 - Valori di $\Delta UEC(tp)^*$ al variare di θ^*

MTTF=7722	$\frac{UEC(tp)\vartheta}{UEC(tp^*)\vartheta}$		2,25	2,5	2,75	3	3,25	3,5	3,75	4	4,25
	θ	tp	7012	6596	6346	6188	6087	6022	5982	5958	5947
2,25	8718,228	7012	1	0,99845517	0,9958288	0,99340406	0,99151493	0,99015144	0,98925289	0,98869155	0,98842864
2,5	8703,161	6596	0,99811052	1	0,99921184	0,99783634	0,99656596	0,99557759	0,9949005	0,99446852	0,994264
2,75	8677,801	6346	0,99386894	0,99905604	1	0,99959492	0,9988877	0,99823648	0,99775662	0,99743914	0,99728613
3	8647,455	6188	0,9886216	0,99695906	0,99951997	1	0,99979605	0,99944122	0,99913266	0,9989138	0,99880494
3,25	8615,098	6087	0,98308231	0,99442257	0,99848327	0,99976153	1	0,99990026	0,99973676	0,99960051	0,99952838
3,5	8582,411	6022	0,97763092	0,99183006	0,99727444	0,99926471	0,99988541	1	0,99995575	0,99988635	0,99984368
3,75	8550,338	5982	0,9724655	0,98938459	0,99609879	0,99871662	0,99966074	0,99995004	1	0,99998221	0,99996196
4	8519,394	5958	0,96768309	0,98718817	0,9950611	0,99822425	0,99943487	0,99986066	0,99998078	1	0,99999542
4,25	8489,84	5947	0,96332372	0,98528549	0,99420892	0,99783766	0,99925994	0,99978563	0,99995297	0,9999953	1

Tabella 4.6.16 - Rapporto tra $UEC(tp)$ ottimo (minimo) e $UEC(tp)^*$

4.7 Analisi di manutenzione preventiva per le camicie motore MAN

A livello tecnico le camicie dei cilindri di un qualsiasi motore a combustione interna sono degli elementi cilindrici costituiti da ghisa centrifugata con una leggera aggiunta in lega di cromo per resistere meglio all'usura.

La funzione principale delle camicie è quella di offrire una superficie molto dura e resistente ma allo stesso tempo che garantisca bassi coefficienti di attrito con le superfici di contatto del pistone e delle fasce elastiche di tenuta.

Ulteriore funzione è quella di garantire un ottimo scambio termico tra la parte interna del cilindro e il liquido refrigerante che tipicamente scorre attraverso opportuni canali che vengono a crearsi tra le camicie e il basamento centrale del motore, oltre che, alla tenuta di tale liquido in prossimità della guarnizione di testa.

Nel caso del motore MAN che equipaggia i GTW si sono riscontrati nell'esercizio fenomeni più o meno gravi indotti da una eccessiva usura di una o più camicie al punto da compromettere l'intero motore portandolo al grippaggio.

In linea di massima, con i dati raccolti dall'officina assieme al CUTDO, è stato possibile definire il cedimento di una o più camicie dopo una percorrenza di:

- 1^a Serie ATR 110-120 → 250.000 ÷ 350.000 km
- 2^a Serie ATR 116-126 → 400.000 ÷ 450.000 km

I range così definiti sono sensibili, come ciascun altro componente discusso in questa relazione, alle temperature di lavoro che ovviamente nel periodo estivo, essendo di entità superiore, tendono a indurre un'usura maggiore portando a cedimento del sistema più precocemente.

Altro fattore da non trascurare è la tipologia di materiali (lega) impiegati per la produzione delle camicie che, sulla base dei primi guasti riscontrati sulle prime serie degli ATR, comportavano danni particolarmente compromettenti al motore.



Figura 4.7.1 – Esempio di camicia di un motore a combustione interna

Per quanto riguarda i principali indici che consentono di riscontrare il cedimento delle camicie, il macchinista e l'officina possono avvalersi di tre sensi percettivi:

- *Visivo* → In particolare durante la messa in moto o con motore sotto carico
- *Acustico* → Rumori e vibrazioni anomali provenienti dall'interno del motore
- *Prestazionale* → Se sussistono trafileamenti di acqua e/o olio il motore renderà di meno

Nel primo caso basta osservare i terminali di scarico posti sull'imperiale del modulo di trazione: se emettono fumo per un periodo prolungato durante la messa in moto o in modo continuativo con motore sotto carico sussiste già un indice di anomalia:

- Nel dettaglio in caso di **fumo nero** il problema può esser ricondotto a sporcizia nell'impianto di aspirazione, di alimentazione o agli iniettori.
- Nel caso di **fumo bianco o leggermente bluastro** potrebbe esser stata compromessa una o più camicie che, a causa dell'eccessiva usura permettono il trafileamento all'interno della camera di combustione di liquido di raffreddamento e/o olio lubrificante.

Dopo questa breve descrizione tecnica è possibile andare direttamente a stimare l'*MTTF* di primo tentativo per effettuare i medesimi calcoli fatti nel paragrafo 4.5 e 4.6.

Dato che conviene sempre porsi in condizioni cautelative, che consentano di avere comunque il quadro più critico del nuovo scenario manutentivo, si mantiene la media di percorrenza effettuata prima di un guasto riferita alla prima serie di GTW e quindi:

$$MTTF^* = \frac{250.000 + 350.000}{2} = 300.000 \text{ km}$$

Come per il convertitore IGBT andiamo a convertire la percorrenza in ore di servizio:

$$\text{Giorni equivalenti} = gg_{Eq.} = \frac{MTTF^*}{600km} = 500 \text{ giorni}$$

$$\text{Ore di lavoro equivalenti} = gg_{Eq.} \cdot 16 \text{ h/giorno} = 8000h$$

Si calcolano quindi i costi indotti da una manutenzione preventiva C_p e a guasto C_f :

$$C_p = C_{Ricambio} + (N_{Operatori} \cdot MTTR_{Preventivo} \cdot C_{Operatore})$$

$$C_f = C_{Ricambio} + (N_{Operatori} \cdot MTTR_{Guasto} \cdot C_{Operatore}) + (C_{Fermo} \cdot MTTR_{Guasto})$$

Dove anche in questo caso le varie voci di costo valgono:

- $C_{Operatore} = 25€/h$ → È il costo orario di un singolo manutentore.
- $N_{Operatori} = 3$ → Dato che occorre rimuovere il motore dal modulo motore.
- $MTTR_{Preventivo} = 48h$ → Tempo medio tipicamente impiegato per sostituire una camicia
- $C_{Ricambio} = 2500€$ → E' il costo medio di una camicia che varia tra i 2000 e i 3000€

Da tener presente che molto spesso si guastano contemporaneamente 3 o 4 camicie contemporaneamente ma, ai fini di questo calcolo valutiamo il singolo componente.

Si ottiene quindi che:

$$C_p = 2500 + (3 \cdot 48 \cdot 25) = 6100€/intervento preventivo$$

- $MTTR_{Guasto} = 6h + 48h = 54h$

Qui la situazione è leggermente differente poiché vengono considerare le abbondanti 6h necessarie al rientro della macchina da Rovigo e le restanti 48h vengono utilizzate per la sostituzione completa del motore al fine di consentire poi a posteriori di inviare il motore guasto in riparazione presso un centro autorizzato MAN.

Questa vicissitudine viene considerata poiché si assume che nella manutenzione preventiva si decida di intervenire a seguito di un controllo in officina o a seguito di una segnalazione del macchinista; caso diverso per il guasto poiché il soccorso del mezzo avviene principalmente per un danneggiamento irreversibile del motore quale il grippaggio.

Riprendendo il calcolo dei costi si era visto che per una manutenzione a guasto occorre imputare un costo di fermo macchina pari a:

- $C_{Fermo} \cong 150€/h$

Dato che si rende necessaria la sostituzione completa del motore allora il costo del ricambio va ricalcolato tipicamente sul costo di una revisione completa da parte del centro specializzato MAN:

- $C_{ricambio_{GUASTO}} = 30.000€$

Da cui otteniamo il costo di manutenzione a guasto:

$$C_f = 30.000 + (3 \cdot 54 \cdot 25) + (150 \cdot 54) = 42150€/intervento a guasto$$

Nota:

Il costo così calcolato non è ancora corretto poiché i manutentori non vengono impiegati per 54h ma solo per il tempo di sostituzione del motore richiede circa 48h di lavoro:

$$C_f' = 2500 + (3 \cdot 48 \cdot 25) + (150 \cdot 54) = 41700\text{€/intervento a guasto}$$

Si va, come di consueto a mappare, in base C_f e C_p appena calcolati, gli MTTF che si ottengono al variare di β e θ :

MTTF*=8000h		BETA																				
		1	1,25	1,5	1,75	2	2,25	2,5	2,75	3	3,25	3,5	3,75	4	4,25	4,5	4,75	5	5,25	5,5	5,75	6
THETA	8500	8500	7916,762	7673,335	7570,251	7532,929	7528,709	7541,742	7563,783	7590,326	7618,834	7647,851	7676,538	7704,421	7731,241	7756,873	7781,269	7804,434	7826,399	7847,212	7866,93	7885,614
	8750	8750	8149,608	7899,021	7792,905	7754,486	7750,141	7763,558	7786,247	7813,571	7842,917	7872,788	7902,319	7931,022	7958,631	7985,016	8010,13	8033,976	8056,587	8078,012	8098,311	8117,544
	9000	8999,999	8382,454	8124,708	8015,56	7976,042	7971,574	7985,374	8008,711	8036,816	8067,001	8097,725	8128,099	8157,622	8186,02	8213,159	8238,991	8263,519	8286,776	8308,813	8329,691	8349,474
	9250	9249,999	8615,3	8350,394	8238,214	8197,599	8193,007	8207,19	8231,175	8260,06	8291,084	8322,661	8353,88	8384,223	8413,409	8441,302	8467,852	8493,061	8516,964	8539,613	8561,071	8581,404

Tabella 4.7.2 - Valori di MTTF per diverse combinazioni di β e θ

MTTF*=8000h		BETA											
		2,5	2,75	3	3,25	3,5	3,75	4	4,25	4,5	4,75	5	5,25
THETA	8750	7763,558	7786,247	7813,571	7842,917	7872,788	7902,319	7931,022	7958,631	7985,016	8010,13	8033,976	8056,587
	8800	7807,922	7830,74	7858,22	7887,734	7917,775	7947,475	7976,342	8004,108	8030,644	8055,902	8079,885	8102,625
	8850	7852,285	7875,232	7902,869	7932,551	7962,763	7992,631	8021,662	8049,586	8076,273	8101,675	8125,793	8148,663
	8900	7896,648	7919,725	7947,518	7977,367	8007,75	8037,787	8066,982	8095,064	8121,902	8147,447	8171,702	8194,7
	8950	7941,011	7964,218	7992,167	8022,184	8052,737	8082,943	8112,302	8140,542	8167,53	8193,219	8217,61	8240,738
	9000	7985,374	8008,711	8036,816	8067,001	8097,725	8128,099	8157,622	8186,02	8213,159	8238,991	8263,519	8286,776

Tabella 4.7.3 - Ingrandimento area MTTF più prossimi a MTTF*

MTTF*=8000h		BETA								
		2,75	3	3,25	3,5	3,75	4	4,25	4,5	4,75
THETA	8500	7786,247	7813,571	7842,917	7872,788	7902,319	7931,022	7958,631	7985,016	8010,13
	8550	7830,74	7858,22	7887,734	7917,775	7947,475	7976,342	8004,108	8030,644	8055,902
	8600	7875,232	7902,869	7932,551	7962,763	7992,631	8021,662	8049,586	8076,273	8101,675
	8650	7919,725	7947,518	7977,367	8007,75	8037,787	8066,982	8095,064	8121,902	8147,447
	8700	7964,218	7992,167	8022,184	8052,737	8082,943	8112,302	8140,542	8167,53	8193,219
	8750	8008,711	8036,816	8067,001	8097,725	8128,099	8157,622	8186,02	8213,159	8238,991

Tabella 4.7.4 - Raggruppamento dei range di β e θ che consentono di ottenere l'MTTF prossimo a MTTF*

Da cui si ricava la mappa seguente:

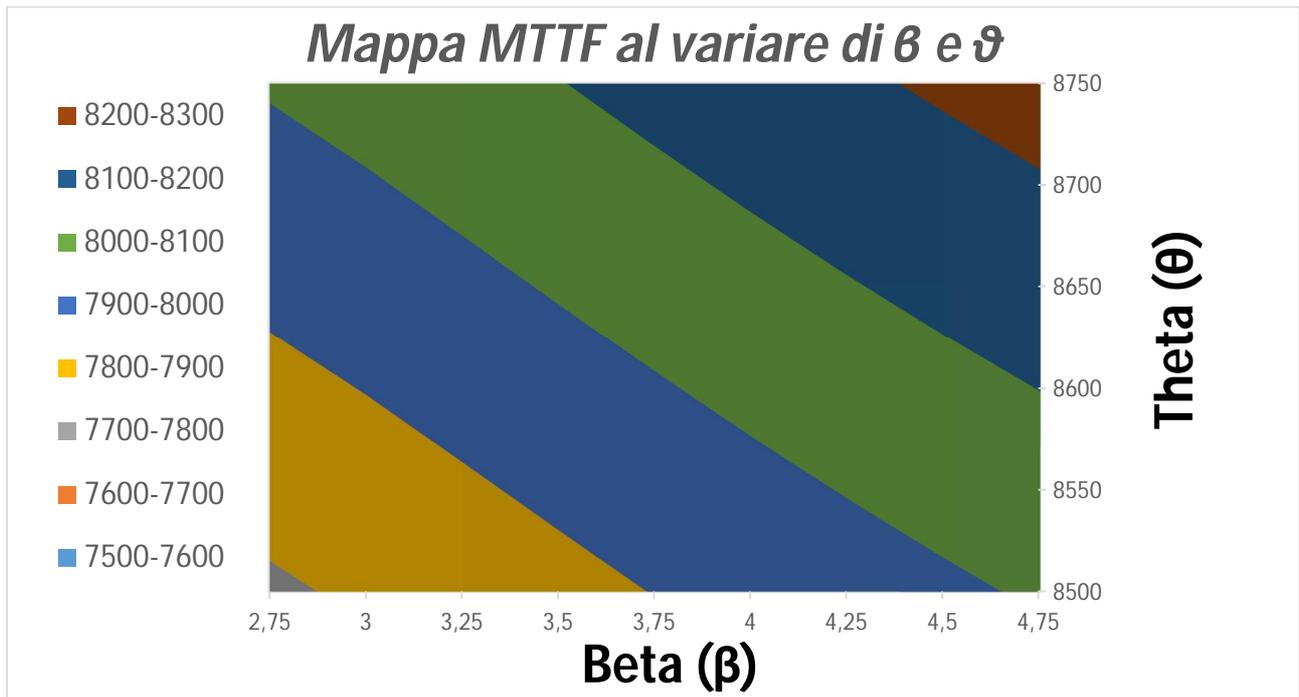


Figura 4.7.5 - Mappa degli MTTF al variare di β e ϑ

Si vanno pertanto a calcolare i valori di t_p che minimizzano il costo ovvero gli $UEC(t_p)$:

Beta (β)	2,75	3	3,25	3,5	3,75	4	4,25	4,5	4,75
t_p	3880	3964	4053	4143	4233	4321	4422	4488	4568
$UEC(t_p)$	2,502831	2,33339	2,1937872	2,0769972	1,9779900	1,893069	1,8131641	1,7551120	1,6983605
theta (ϑ)	8990,210	8958,77	8925,2501	8891,3866	8858,1593	8826,1012	8826,1012	8766,4196	8738,9341
$UEC(t_p)*\vartheta$	22500,984	20904,387	19580,099	18467,385	17521,351	16708,425	16003,170	15386,048	14841,861

Tabella 4.7.6 - Valori di t_p e $UEC(t_p)$ al variare di β per ϑ necessario ad ottenere MTTF pari a 8000h

Da cui si ricavano le variazioni dei costi unitari attesi nel caso in cui dovesse essere adottato un β diverso da quello calcolato detto β^* ovvero l' $UEC(t_p^*)$ dove t_p^* è il tempo di manutenzione preventiva ottenuto al β^* :

		BETA								
		2,75	3	3,25	3,5	3,75	4	4,25	4,5	4,75
MTTF=8000 Cp=6100 Cf=41700	theta (ϑ)	8990,211	8958,772	8925,25	8891,387	8858,159	8826,101	8795,483	8766,42	8738,934
	t_p	3880	3964	4053	4143	4233	4321	4406	4488	4568
	$UEC(t_p)$	2,50283	2,33339	2,19378	2,07699	1,97799	1,89306	1,81947	1,755112	1,69836058
	$UEC(t_p)*\vartheta$	22500,9	20904,3	19580,0	18467,38	17521,31	16708,42	16003,17	15386,04	14841,86

Tabella 4.7.8 - Calcolo di ϑ , t_p e $UEC(t_p)$ al variare di β per MTTF pari a 8000h

Si vanno a riportare quindi le tabelle relative ai costi unitari attesi e successive combinazioni:

MTTF=800 0	UEC(tp)		2,75	3	3,25	3,5	3,75	4	4,25	4,5	4,75
	θ	tp	3880	3964	4053	4143	4233	4321	4406	4488	4568
2,75	8990,211	3880	2,5028	2,5038	2,5067	2,5116	2,5184	2,5267	2,5363	2,5468	2,5583
3	8958,772	3964	2,3344	2,3334	2,3345	2,3377	2,3430	2,3500	2,3585	2,3681	2,3789
3,25	8925,25	4053	2,1981	2,1949	2,1938	2,1949	2,1983	2,2036	2,2105	2,2188	2,2284
3,5	8891,387	4143	2,0873	2,0817	2,0782	2,0770	2,0781	2,0814	2,0865	2,0932	2,1014
3,75	8858,159	4233	1,9968	1,9888	1,9828	1,9792	1,9780	1,9791	1,9822	1,9871	1,9936
4	8826,101	4321	1,9227	1,9123	1,9038	1,8978	1,8942	1,8931	1,8941	1,8971	1,9017
4,25	8795,483	4406	1,8619	1,8492	1,8382	1,8298	1,8239	1,8205	1,81947	1,8204	1,8232
4,5	8766,42	4488	1,8118	1,7969	1,7837	1,7730	1,7648	1,7593	1,7561	1,7551	1,7560
4,75	8738,934	4568	1,7705	1,7536	1,7383	1,7254	1,7151	1,7074	1,7022	1,6993	1,6984

Tabella 4.7.9 - Valori degli UEC(tp*) al variare di θ per ϑ costante

MTTF=8000	UEC(tp)* ϑ		2,75	3	3,25	3,5	3,75	4	4,25	4,5	4,75
	θ	tp	3880	3964	4053	4143	4233	4321	4406	4488	4568
2,75	8990,211	3880	22500,98	22509,34	22535,89	22580,24	22641,20	22716,00	22801,77	22896,47	22999,63
3	8958,772	3964	20913,23	20904,39	20914,20	20943,18	20990,40	21053,33	21129,12	21215,60	21312,06
3,25	8925,25	4053	19618,88	19590,16	19580,10	19590,30	19620,07	19667,29	19729,21	19803,53	19889,34
3,5	8891,387	4143	18559,20	18509,37	18477,87	18467,39	18477,55	18506,70	18552,24	18611,80	18684,23
3,75	8858,159	4233	17688,33	17617,21	17563,76	17531,83	17521,35	17531,15	17558,85	17602,05	17659,36
4	8826,101	4321	16970,15	16878,23	16803,13	16749,78	16718,43	16708,43	16717,62	16743,62	16784,80
4,25	8795,483	4406	16375,99	16264,23	16168,29	16094,10	16042,23	16012,55	16003,17	16011,70	16036,33
4,5	8766,42	4488	15882,92	15752,58	15636,93	15542,86	15471,24	15422,44	15394,82	15386,05	15394,13
4,75	8738,934	4568	15472,54	15325,02	15191,01	15078,26	14987,91	14920,82	14875,62	14850,02	14841,86

Tabella 4.7.10 - Valori degli UEC(tp*) moltiplicati per il ϑ di riferimento

MTTF=8000	$\Delta UEC(tp)^*\theta$		2,75	3	3,25	3,5	3,75	4	4,25	4,5	4,75
	θ	tp	3880	3964	4053	4143	4233	4321	4406	4488	4568
2,75	8718,228	3880	0,000	8,357	34,907	79,251	140,213	215,018	300,789	395,488	498,643
3	8703,161	3964	8,842	0,000	9,808	38,796	86,008	148,940	224,734	311,207	407,672
3,25	8677,801	4053	38,778	10,056	0,000	10,198	39,970	87,194	149,112	223,434	309,238
3,5	8647,455	4143	91,812	41,988	10,482	0,000	10,167	39,316	84,851	144,412	216,840
3,75	8615,098	4233	166,980	95,854	42,412	10,480	0,000	9,803	37,501	80,698	138,005
4	8582,411	4321	261,729	169,803	94,709	41,354	10,003	0,000	9,198	35,192	76,377
4,25	8550,338	4406	372,820	261,059	165,117	90,926	39,060	9,382	0,000	8,528	33,162
4,5	8519,394	4488	496,874	366,528	250,880	156,814	85,194	36,389	8,775	0,000	8,081
4,75	8489,84	4568	630,674	483,154	349,145	236,399	146,053	78,958	33,760	8,155	0,000

Tabella 4.7.11 - Valori di $\Delta UEC(tp)^*$ al variare di θ^*

MTTF=8000	$\frac{UEC(tp)\theta}{UEC(tp^*)\theta}$		2,75	3	3,25	3,5	3,75	4	4,25	4,5	4,75
	θ	tp	3880	3964	4053	4143	4233	4321	4406	4488	4568
2,75	8718,228	3880	1	0,99962872	0,99845103	0,99649026	0,99380717	0,99053453	0,98680851	0,98272714	0,97831953
3	8703,161	3964	0,99957722	1	0,99953102	0,99814757	0,99590251	0,9929256	0,98936378	0,9853312	0,98087129
3,25	8677,801	4053	0,99802344	0,99948666	1	0,99947943	0,99796279	0,99556655	0,99244208	0,98871746	0,98445207
3,5	8647,455	4143	0,99505303	0,99773154	0,99943273	1	0,99944975	0,99787559	0,99542639	0,99224083	0,98839449
3,75	8615,098	4233	0,99055989	0,99455907	0,99758523	0,99940225	1	0,99944082	0,99786426	0,99541541	0,99218517
4	8582,411	4321	0,98457709	0,9899395	0,99436361	0,99753106	0,9994017	1	0,99944982	0,99789821	0,99544961
4,25	8550,338	4406	0,97723372	0,98394886	0,98978761	0,99435034	0,99756517	0,99941411	1	0,99946739	0,99793205
4,5	8519,394	4488	0,96871648	0,97673216	0,98395592	0,98991089	0,9944934	0,99764054	0,99943003	1	0,99947503
4,75	8489,84	4568	0,95923912	0,96847283	0,97701636	0,98432187	0,99025527	0,99470819	0,99773054	0,99945082	1

Tabella 4.7.12 - Rapporto tra $UEC(tp)$ ottimo (minimo) e $UEC(tp^*)$

CONCLUSIONI

Scopo di questo lavoro deriva principalmente dalla volontà di proporre un modello matematico che, sulla base dell'esperienza maturata durante la mansione da macchinista e del feedback ricevuto su cortesia della squadra manutentiva di Piove di Sacco, consenta di operare a livello manutentivo in modo tale da garantire sempre lo stato ottimale delle macchine accompagnato da una migliore organizzazione del rientro delle stesse per le ispezioni programmate, gli interventi manutentivi e dell'abbattimento dei costi.

Come già anticipato, attualmente, nel deposito locomotive di Piove di Sacco opera una squadra manutentiva appositamente inviata dal costruttore (Stadler) che a fine 2016 terminerà il contratto di appalto delle manutenzioni in garanzia dei veicoli GTW.

Dato che i lavori di manutenzione devono essere effettuati soltanto da personale appositamente addestrato, nell'ottica di preparare opportunamente la squadra manutentiva "di casa" al fine di farne raggiungere nel breve periodo tutte le competenze necessarie per garantire la sicurezza di esercizio, sarebbe possibile immaginare di effettuare tutte le operazioni, subappaltate ora ad ente esterno, con una squadra manutentiva dedicata esclusivamente ai nuovi veicoli che, tra qualche anno, dovrebbero andare a sostituire interamente tutto il vecchio parco macchine di eredità della FAM.

L'idea così raggiunta prevede quindi di sostituire in toto una squadra manutentiva esterna il cui costo, anche se concordato a priori, potrebbe risultare superiore dando pieno vantaggio ad una politica manutentiva interna.

Il progetto, pur sembrando molto ambizioso a causa della necessità di ampliare l'organico da dedicare alla manutenzione, potrebbe rivelarsi una mossa vincente poiché, con un ampliamento generale del metodo fornito da questo elaborato, si potrebbe sopperire alla mancanza di dati (noti solo al costruttore) che, una volta stimati, permetterebbero di garantire i minimi costi oltre che ottimizzare al meglio le cadenze manutentive al fine di ridurre al minimo i fenomeni di guasto in linea e successivi mancati servizi (o soppressioni di servizio).

La chiave di questo concetto risiede nell'estensione dei singoli calcoli esplicitati nei capitoli 4.5, 4.6 e 4.7 a tutti i componenti che possono essere considerati "critici" per la salute del veicolo oltre che ad un miglioramento complessivo del sistema di gestione guasti che potrebbe essere ampiamente potenziato tramite sistema informatizzato:

- Ad uso del macchinista per la segnalazione guasti in tempo reale.
- Ad uso del capo officina per la ricezione del guasto.

Tale sistema può essere ulteriormente ampliato tramite l'adozione di telediagnostica di bordo che, allo stato attuale della tecnologia, consente di inviare informazioni in tempo reale sullo stato di salute della macchina, o di suoi componenti, all'agente di condotta per dare avvisi in tempi utili ad evitare cedimenti che porterebbero a compromettere il servizio; allo stesso tempo la telediagnostica sarebbe valido alleato dell'officina permettendo di intervenire a distanza o generare un piano di rientro più opportuno per quel veicolo.

Ulteriore miglioramento del servizio potrebbe essere ottenuto sfruttando quanto già in possesso nel parco rotabili a Sistemi Territoriali S.p.A. e quanto offrono gli sviluppi tecnologici del costruttore Stadler:

Avendo a disposizione 5 veicoli GTW 4/12 muniti quindi di 2 moduli di trazione ciascuno, potrebbe risultare vantaggioso presupporre di adottare una modifica in composizione.

Tale modifica prevede il troncamento dei due semitreni e collegare ad ognuno di essi una ulteriore semicassa munita di cabina di guida.

In questo modo da 1 convoglio costituito da 2 semitreni si otterrebbero 2 convogli costituiti da 3 elementi ciascuno.

La semicassa munita di cabina di guida diventerebbe pertanto una semi-pilota "appesa" alla semicassa di coda ad un singolo semitreno:



Figura 0.1 – GTW 2/8 di una impresa delle Ferrovie Federali Svizzere SBB

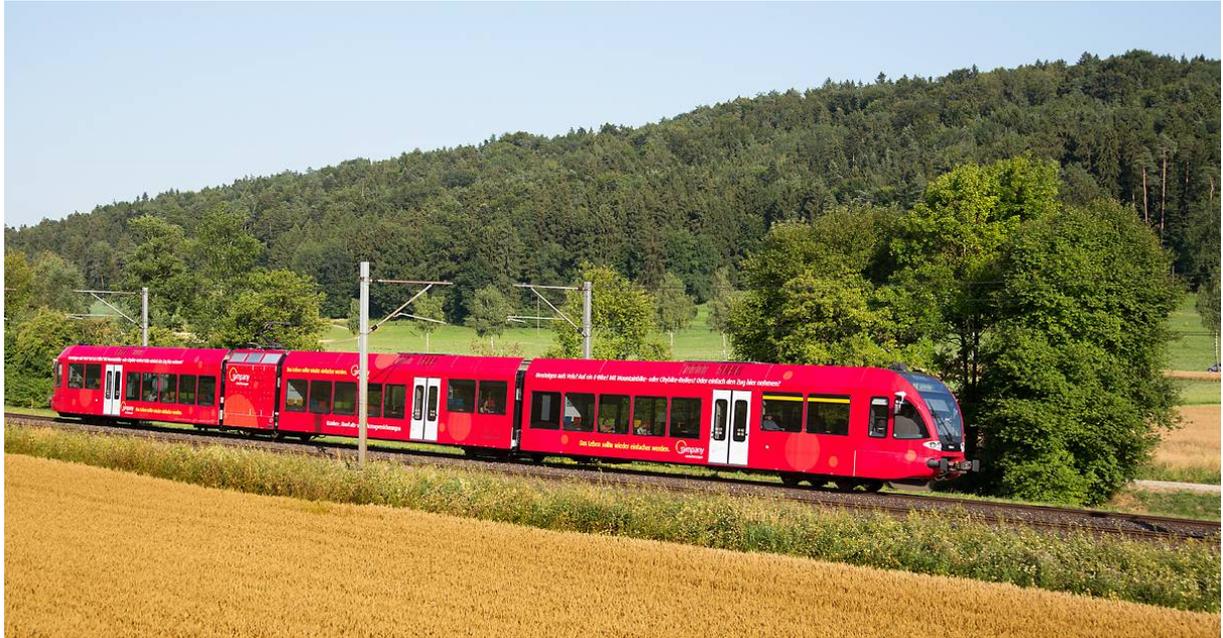


Figura 0.2 – Altro esempio di GTW 2/8

Grazie a questa soluzione (già utilizzata in altri stati dell'Unione Europea) sarebbe possibile (con un costo nettamente inferiore rispetto ad un ordine di nuovi convogli a 2 semicasse GTW 2/6) riuscire a raddoppiare la disponibilità dei mezzi in un tempo ridotto consentendo di sfruttare al meglio le potenzialità dei singoli moduli di trazione.

La possibilità di raddoppiare nel breve periodo la disponibilità di mezzi più recenti, a confronto delle automotrici ALn 663 e 668, permetterebbe di soddisfare al contempo esigenze di un servizio migliore per la clientela, costituito principalmente da un livello di comfort superiore e probabile miglioramento delle percorrenze, grazie all'aumentata prestazione dei veicoli e aumento della capacità di carico.

Cosa da non trascurare è inoltre l'economicità di servizio legata alla soluzione ibrida della trazione che, ottenendo un netto abbattimento degli inquinanti, permette la riduzione dei consumi di gasolio.

L'utilizzo di mezzi più moderni in servizio consente inoltre di andare ad eliminare nel tempo le macchine meno recenti permettendo nel complessivo un miglioramento della vita lavorativa del personale di macchina (ergonomia, silenziosità, assenza di vibrazioni ecc.) e del personale addetto alla manutenzione (la struttura modulare degli Stadler consente di operare durante le manutenzioni in modo efficace e sicuro).

BIBLIOGRAFIA

- [1]. 2M Servizi – Ing. Marco Minati – Teoria della manutenzione.
- [2]. Filiera Produttiva Del Servizio Ferroviario: Il Caso Sistemi Territoriali S.p.A. – Iacopo Mazzi (Università degli Studi di Padova)
- [3]. Modelli Di Ottimizzazione Dei Costi Di Manutenzione - Federico Garetti (Politecnico di Milano)
- [4]. Quality and Reliability Management and Its Applications: Systemability: A New Reliability Function for Different Environments (2016) – A.Persona et al.
- [5]. Industrial Maintenance Policy Development: Aquantitativeframework (2011) - M. Faccio, A.Persona, F.Sgarbossa, G.Zanin.
- [6]. La manutenzione dei Rotabili - Ing. Angelo Mattioli.
- [7]. Furlanetto L., Garetti M., Macchi M. (2006). “Principi generali di gestione della manutenzione”. FrancoAngeli, Milano.
- [8]. Appunti del corso di “Manutenzione dei sistemi industriali” – Università degli studi di Padova.
- [9]. UNI 10147:2003. “Manutenzione - Criteri di progettazione della manutenzione”.
- [10]. Barlow R. E., Hunter L. C. (1960). “Optimum Preventive Maintenance Policies”. Operations Research. 8. 90-100.
- [11]. Nguyen D. G., Murthy D. N. P. (1981). “Optimal Preventive Maintenance Policies for Repairable Systems”. Operations Research. 29. 1181-1194

SITOGRAFIA

- [1]. https://it.wikipedia.org/wiki/Sistemi_Territoriali
- [2]. https://it.wikipedia.org/wiki/Stadler_Rail
- [3]. https://it.wikipedia.org/wiki/Stadler_GTW
- [4]. https://it.wikipedia.org/wiki/Stadler_GTW_2/6
- [5]. https://it.wikipedia.org/wiki/Stadler_GTW_2/8
- [6]. https://it.wikipedia.org/wiki/Stadler_GTW_4/12
- [7]. https://it.wikipedia.org/wiki/Stadler_FLIRT
- [8]. https://it.wikipedia.org/wiki/Locomotiva_D.752
- [9]. <https://it.wikipedia.org/wiki/TRAXX>
- [10]. <https://it.wikipedia.org/wiki/Manutenzione>
- [11]. https://it.wikipedia.org/wiki/Ferrovie_dello_Stato_Italiane
- [12]. <http://www.rfi.it/>

RINGRAZIAMENTI

Desidero ringraziare tutti coloro che per questo lungo tempo mi hanno aiutato nella stesura di questa tesi con preziosi suggerimenti, critiche costruttive ed osservazioni: a loro va la mia più profonda gratitudine e il massimo rispetto.

Ringrazio anzitutto il Professor Fabio Sgarbossa per i preziosi consigli e la fiducia riposta oltre che per il tempo prezioso che ha dedicato alla mia tesi.

Profonda gratitudine e stima vanno agli Ingegneri Angelo Mattioli e Corrado Biscaro che nel primo periodo effettuato con Trenitalia Cargo hanno sempre dimostrato la massima disponibilità rendendo ancor più forte la passione che ho sempre dimostrato di avere fin da bambino nei confronti della ferrovia.

Un sentito ringraziamento va agli ATR 116.001, 110.201 e 110.202 per aver sopportato incolumi ad alcuni esperimenti che mi sono risultati estremamente utili ai fini didattici oltre che ad una miglior comprensione delle potenzialità dei mezzi.

Un pensiero e un sentito ringraziamento vanno inoltre:

Ai miei istruttori Giacomo Baruzzo e Nicola Fabris e ai due Capi Officina Maurizio Pinato e Franco Stigliano per avermi aiutato con la raccolta dei dati necessari oltre che, avermi dato sempre ottimi consigli e opinioni in merito alla tesi.

A Marco Ciaffei, grandissimo collega macchinista, che con la sua smisurata passione per la ferrovia ha sempre saputo darmi ottimi consigli e supporti.

Ai miei amici per avermi sopportato tutto questo tempo, in particolar modo nell'ultimo periodo dove le mie uniche parole erano "devo finire la tesi" e "ho bisogno di ferie", che elenco qui di seguito:

Giancarlo, Niccolò e Riccardo e loro consorti (Camilla, Maddalena e Lucia) per il team degli "ammogliati".

Cristiano, Damiano, Davide, Federico, Francesco (detto il grosso), Maicol e Riccardo per il team "scapoli...e non solo".

A tutti i miei compagni di corso per la formazione macchinisti che, oltre a farmi vivere momenti che rimarranno sempre un bellissimo ricordo, hanno cercato di tenermi aggiornato sui vari guasti che capitavano pure a loro: Alessandro, Andrea, Antonio (ciao Antonio!), Daniele ("il Colonnello"), Paolo, Stefano e a Peeter (a cui mettevo sempre i sassi sulla rotaia).

Al Capotreno Paolo per aver svaligiato la macchinetta delle bibite donandomi bottigliette d'acqua nei momenti di bisogno (quando non funzionava l'aria condizionata in cabina) oltre che a farmi prendere un richiamo dal nostro istruttore (lui sa il perché).

Alla Michela che a termine turno, quando poteva, ci deliziava con i suoi dolcetti fatti in casa.

A tutti i colleghi del deposito di Rovigo e dell'officina di Piove di Sacco.

Altro particolare ringraziamento va a Simone Spinello che, oltre a motivarmi, è sempre stato al mio fianco aiutandomi nei momenti di crisi quando non mi tornavano i conti o quando venivo rifiutato dalle ragazze.

Il mio pensiero va ovviamente a mamma Rina e papà Elio, senza i quali non sarei mai potuto arrivare a questo grandissimo traguardo. Il loro sostegno, sempre accompagnato da quello di mia sorella Nicoletta e suo marito Manuel (e ovviamente a Maddalena e Olivia), mi ha fatto superare con successo tutte le difficoltà, i dubbi, le ansie che ho affrontato fino ad ora; sostegno che sicuramente non mancherà mai per qualunque cosa accada in futuro.

