POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile

Tesi di Laurea Magistrale

Esercizio del materiale rotabile sulla Ferrovia Canavesana: analisi degli interventi manutentivi mediante simulazione multi – scenario.

Relatore: Prof. Ing. Bruno Dalla Chiara

Correlatore: Ing. Claudia Caballini

Tutor aziendale: Ing. Pier Galileo La Scala

Candidato: Matteo Agostino

Marzo 2020

Sommario

Introduzione 5

La Ferrovia Canavesana e l'officina di manutenzione di Rivarolo C.se 7

PARTE I: Analisi dell'esercizio sulla Ferrovia Canavesana: aspetti normativi, tecnici e metodologici. Studio dell'attività di manutenzione ferroviaria. 9

1. Il materiale rotabile 10

1.1. Meccanica della locomozione 10

1.1.1. La curva caratteristica di trazione 10

1.1.2. Virtualità della linea 14

1.2. Sistemi di trazione 16

1.2.1. Confronto tra i sistemi di trazione 17

1.2.2. Prestazioni di una locomotiva 18

1.2.3. Gli organi di rotolamento 21

1.3. I sistemi di frenatura 25

1.4. Ale 501 – Le 220 – Ale 502 30

2. Regolamentazione e organizzazione dell'esercizio ferroviario 34

2.1. Panoramica generale dell'esercizio ferroviario 35

2.1.1. Caratteristiche del trasporto viaggiatori 35

2.1.2. Documentazione a servizio dell'impresa ferroviaria 38

2.1.3. L'orario ferroviario 43

2.1.4. Definizioni ed esigenze di velocità 55

2.1.5. Organizzazione della linea 56

2.2. La normativa d'esercizio 59

2.2.1. Prefazione Generale all'Orario di Servizio 59

2.2.2. Regolamento Circolazione dei Treni 61

2.2.3. Il treno 67
3. Segnalamento, circolazione nelle stazioni e sicurezza nell'esercizio ferroviario 75
3.1 Il segnalamento 75
3.1.1 Tavole di orientamento 79
3.1.2 Segnali di limitazione di velocità e indicatori di partenza 80
3.1.3 Indicatori di direzione 81
3.1.4 Indicazione con lettere 82
3.1.5 Segnali per le manovre 83
3.1.6 Segnali di velocità 84
3.2 La circolazione nelle stazioni 85
3.2.1 Le stazioni 85
3.2.2 Movimento dei treni nelle stazione 87
3.2.3 L'evoluzione degli apparati in stazione 92
3.3 L'Agenzia Nazionale per la Sicurezza Ferroviaria (ANSF) 95
3.3.1 Normativa ANSF 96
4. La manutenzione 98
4.1. Teoria della manutenzione 101
4.1.1. Impiego della Teoria dell'Affidabilità 101
4.1.2. Affidabilità 102
4.1.3. Il guasto e curva di mortalità 106
4.1.4. Analisi affidabilistica di Weibul 109
4.2. Strategie manutentive 111
4.2.1. Tipologie e tempi della manutenzione 111
4.2.2. Politiche e filosofie di manutenzione 113
4.2.3. Cicli e trama manutentiva in ambito ferroviario 116
4.3. La manutenzione del materiale rotabile 119
4.3.1. La manutenzione preventiva in campo ferroviario 120
4.3.2. Proposte di evoluzione nella manutenzione del materiale rotabile 122

4.3.3. La manutenzione del materiale rotabile sulla Ferrovia Canavesana 123
4.4. La manutenzione delle ruote ferroviarie 129

PARTE II: Calcolo dei tempi ottimali di riprofilatura delle ruote. Analisi dell'interfaccia Esercizio - Manutenzione tramite simulazione ad eventi discreti. 132

5. Ottimizzazione degli interventi di manutenzione preventiva. Caso studio: la riprofilatura delle ruote sulla Ferrovia Canavesana 133
5.1. Ottimizzazione dei tempi di manutenzione preventiva 134
5.1.1. L'analisi di Weibull 134
5.1.2. Dall'analisi di Weibull alla manutenzione preventiva 136
5.1.3. Descrizione del metodo e relazioni tra le grandezze 139
5.2. Caso studio: la manutenzione delle ruote ferroviarie sulla Linea Canavesana 144
5.2.1. Analisi dei dati storici e definizione del MDBF di primo tentativo 145
5.2.2. Definizione dei costi 146
5.2.3. Passaggio dal MDBF* al MTBF* 148
5.2.4. Calibrazione di θ e β 150
5.2.5. Calcolo dei costi unitari attesi e valori di t_p ottimi 151
5.2.6. Variazione di θ e β e relazioni con l'attuale programma di manutenzione 154
6. Interfaccia tra esercizio e manutenzione: simulazione multi – scenario della programmazione 2020 157
6.1. Programmazione 2020 della Ferrovia Canavesana 157
6.1.1. Composizioni 2020 157
6.1.2. Giro – macchine proposto per la simulazione 163
6.2. La simulazione 168
6.2.1. Il software Arena 173
6.2.2. Progettazione del modello di simulazione 176
6.2.3. Moduli di Arena sviluppati 178
6.3. Campagna di simulazione multi - scenario 182

6.3.1. Scenario n. 0: Schedulazione dell'officina 183
6.3.2. Scenario n. 1: Ritardi dell'officina 187
6.3.3. Scenario n. 2: guasti in linea 189
6.3.4. Scenario n. 3: investimento ed attuazione del giro-ruote 194
6.3.5. Scenario n. 4: investimento di una passerella per la manutenzione ordinaria 199
6.3.6. Confronto tra scenari e conclusioni 201
6.3.7. Sviluppi futuri del programma di simulazione 202
Conclusioni 205
Allegati 208
Bibliografia e Sitografia 209
Ringraziamenti 212

Introduzione

Il trasporto ferroviario riveste oggi un ruolo di primaria importanza per lo spostamento di persone e merci. L'efficienza di questo sistema di trasporto deriva dall'unione di diverse competenze che si specializzano e si completano con l'obiettivo di garantire un servizio sempre più competitivo e moderno. L'interazione tra i diversi ambiti gode di un delicato equilibrio spesso basato su pratiche consolidate e una maturata esperienza.

Nella presente Tesi ci si propone di indagare i nessi tra le principali attività e, in particolare, studiare l'interfaccia tra l'esercizio ferroviario e la manutenzione del materiale rotabile. Al fine di far ciò si divide il testo in due parti. La *Parte I* ripercorre lo studio e l'applicazione dei testi normativi al fine di assumere una conoscenza dettagliata delle regole di circolazione sia in condizioni ordinarie sia durante gli eventi straordinari. Ad essa si aggiunge anche l'analisi dello stato dell'arte in tema di manutenzione, presentando le principali politiche e filosofie presenti ad oggi in letteratura. La *Parte II* verrà dedicata al lavoro simulativo: si illustrerà il modello proposto ed applicato ad un caso studio al fine di determinare e validare un metodo capace di ottimizzare i tempi di manutenzione preventiva minimizzando i costi unitari di intervento. Verrà successivamente progettato uno strumento capace di valutare la bontà della programmazione del materiale rotabile considerando i mutui vincoli di Esercizio e Manutenzione.

Quindi l'obiettivo iniziale è analizzare la normativa attualmente in vigore: un complesso di direttive e pubblicazioni che sottendono a tutte le operazioni necessarie a garantire in sicurezza qualsiasi movimentazione di materiale rotabile. In particolare nel *capitolo 2* e *3* verranno analizzati i principali manuali quali la *Prefazione Generale all'Orario di Servizio*, il *Regolamento Circolazione Treni* e il *Regolamento Segnali*. Negli ultimi anni i testi hanno subito profondi cambiamenti e accompagnano in modo puntuale le innovazioni introdotte nel settore. Le imprese che operano nella circolazione dei treni sono tenute a continui aggiornamenti normativi e hanno la necessità di avere una profonda e completa conoscenza dei testi appena citati. All'analisi del contenuto si affiancano esemplificazioni sulle linee gestite dal Gruppo Torinese Trasporti. Come verrà illustrato i testi non sono da intendersi solo di carattere giuridico, ma forniscono anche validi elementi di calcolo utili in fase di pianificazione dell'esercizio. Si analizzano i passaggi che l'impresa compie per l'erogazione del servizio: dall'orario grafico, alle composizioni fino all'effettuazione delle corse. A tal fine, nel *capitolo 1*, sono richiamati alcuni concetti fondamentali della meccanica della locomozione e più in generale del funzionamento del materiale rotabile. Verranno presentati anche i soggetti del caso di

studio: i TTR[1] Ale501-Le220-Ale502. Lo studio quindi permette di intendere meglio le variabili che influenzano il trasporto ferroviario locale e assumere la competenza nell'analisi di una linea ferroviaria, dalle sue caratteristiche alle implicazioni che hanno nell'erogazione del servizio.

Nel complesso quadro normativo si inserisce il ruolo dell'*Agenzia Nazionale per la Sicurezza Ferroviaria* (ANSF): la sicurezza non riveste solo un motivo di merito nel settore ferroviario ma una continua sfida tecnica e normativa. In questo ambito ha preso sempre più campo l'attenzione verso la manutenzione, soprattutto tramite il Decreto ANSF 04/2012, evidenziando l'importanza di avere una visione unificata tra l'esercizio e la manutenzione. Nel *capitolo 4* vengono illustrati i criteri in base ai quali questo tema riveste un ruolo fondamentale nella gestione del servizio i principali documenti a servizio dell'impresa per l'esecuzione degli interventi.

Al fine di pianificare un giro-macchine coordinato tra esercizio e manutenzione, viene illustrata la problematica dell'usura delle ruote. L'interesse verso tale aspetto è rivestito sia dalla relativa valenza economica per l'azienda sia dal fatto che esse occupano un posto di primaria importanza nella stabilità del veicolo, quindi influiscono sul comfort e sulla sicurezza del viaggio. Una buona progettazione degli interventi di riprofilatura delle ruote consente una diminuzione dei costi e dei tempi di manutenzione, quindi diminuisce i conflitti tra Esercizio e Manutenzione. Nel *capitolo 5,* tramite la teoria dell'affidabilità si affronta il caso studio del calcolo dei tempi di manutenzione preventiva al fine di ridurre i costi unitari attesi.

Tale studio è supportato dalla simulazione ad eventi discreti, effettuata tramite software Arena: viene proposta una campagna di simulazione multi – scenario osservando quali siano gli effetti degli eventi non pianificati sia lato esercizio sia lato manutenzione. Vengono proposti sia scenari svantaggiosi (ritardi e guasti) sia scenari propositivi (azioni di investimento) proponendo eventuali soluzioni alle problematiche illustrate.

[1] TTR: Treni Trasporto Regionale

La Ferrovia Canavesana e l'officina di manutenzione di Rivarolo C.se

L'oggetto di studio per la presente Tesi è la Ferrovia Canavesana, linea che collega le città di Rivarolo, Settimo Torinese e Chieri in Piemonte. La linea è caratterizzata da un singolo binario di proprietà della Regione Piemonte impiegato dall'azienda pubblica Gruppo Torinese Trasporti (GTT) nelle divisioni GTT - Infrastruttura e GTT - Trasporto. La Ferrovia Canavesana percorre 57 km servendo 13 stazioni, costituendo il Servizio Ferroviario Metropolitano Linea 1 (SFM1) e svolgendo un trasporto passeggeri di primaria importanza per l'area del Canavese, posizionata a Nord-Ovest della Città di Torino. Presso la stazione di Settimo Torinese la linea interseca la direttrice Torino – Milano, inserendosi nella Rete Nazionale gestita da Rete Ferroviaria Italiana (RFI). La Ferrovia Canavesana può essere divisa concettualmente in tre parti (Figura 1):

- Le sezione Rivarolo – Settimo Torinese: linea a semplice binario in cui la circolazione è coordinata da un Dirigente di Centrale Operativo (DCO) presso la stazione di Torino Dora [2]. Benché l'infrastruttura permetta velocità superiori, nel 2019 è stato imposto da ANSF il limite di 70 km/h. Come anticipato, presso la stazione di Settimo la ferrovia si inserisce nella Rete Principale attraverso il solo Binario 3, impedendo quindi l'incrocio dei treni presso questa località di servizio.
- La sezione Rivarolo – Pont: linea non elettrificata e gestita con un servizio a spola attraverso la trazione Diesel. La sezione non sarà elemento di studio nella presente Tesi.

Le due sezioni precedenti sono impiegate da GTT che opera come Gestore dell'Infrastruttura e Operatore Ferroviario. La linea è impiegata per il solo trasporto passeggeri ad esclusione di rari carri merci provenienti dallo stabilimento raccordato ENI situato tra Rivarolo e Volpiano.

- La sezione Settimo Torinese – Chieri: la tratta, prevalentemente su Rete Nazionale, attraversa il nodo ferroviario di Torino e si sviluppa fino alla parte Sud-Est della Città Metropolitana, garantendo il collegamento da Trofarello a Chieri su una linea a semplice binario. La tratta è gestita interamente da RFI e GTT opera solo come Operatore Ferroviario. La circolazione è gestita dal DCO presso la stazione di Torino Lingotto.

L'intera linea è utilizzata dai treni riguardanti il Servizio Ferroviario Metropolitano Linea 1 (SFM1). Il servizio, progettato su orario cadenzato con un periodo da 30 a 60 minuti per direzione di marcia, è erogato tramite l'impiego di tre elettromotrici: i TTR Ale501-Le220-Ale502, gli ETRY530 e gli ETR234.

[2] La gestione della circolazione sulle tratte in gestione dal Gruppo Torinese Trasporti è unificata per il SFM1 (Chieri – Rivarolo – Pont) e il SFMA (Torino – Ceres).

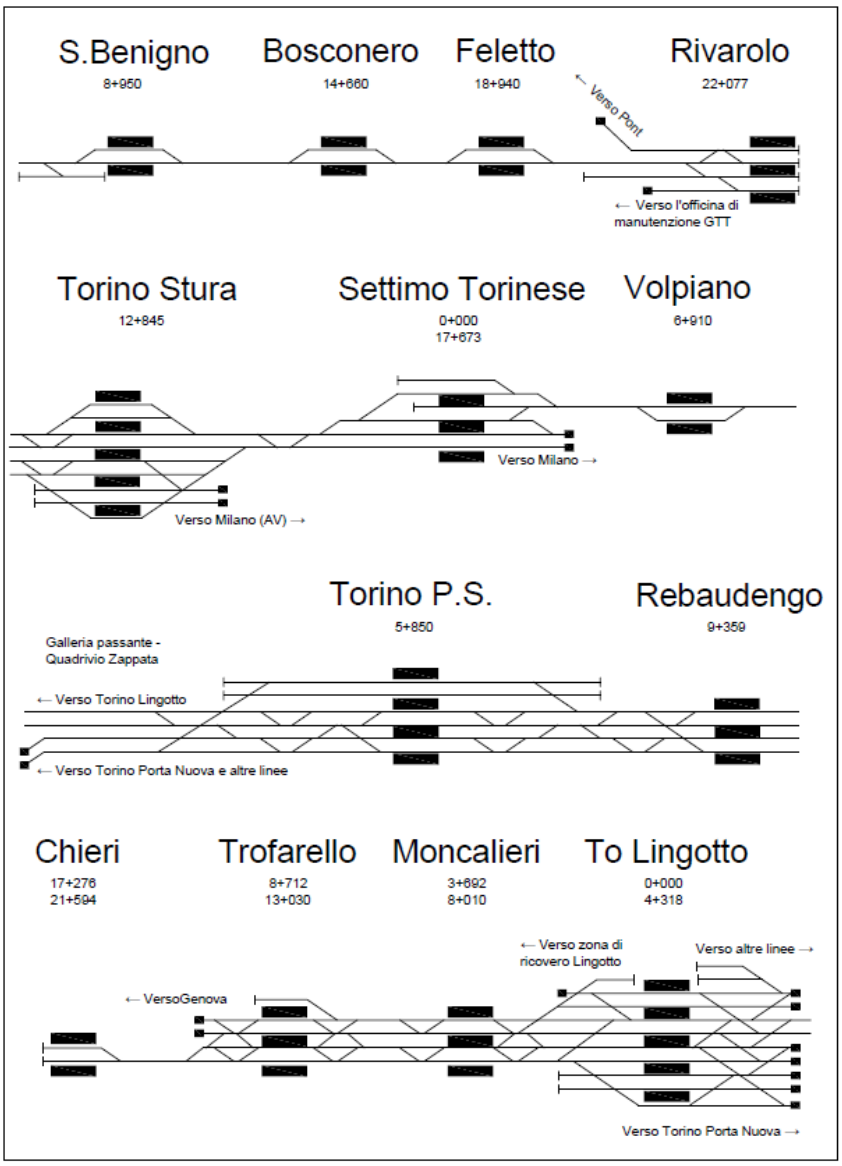


Figura 1 - Piano schematico dell'infrastruttura oggetto di studio.

Presso la stazione di Rivarolo Canavese è presente l'officina di manutenzione di GTT alla quale fanno riferimento i tutti i treni operanti nella linea SFM1. L'officina, di cui si riporta lo schema planimetrico nell'*allegato C*, ha a disposizione due binari dotati di carroponte per le manutenzioni ordinarie e un piazzale antistante per i treni in attesa di manutenzione. Essa è in grado di eseguire tutte le tipologie di manutenzione, ad eccezione della Revisione Generale (RG).

L'effettuazione del servizio passeggeri è gestita dalla Direzione dell'Esercizio presso la stazione di Torino Dora; la gestione delle risorse dell'officina e la pianificazione degli interventi sono coordinati dagli uffici di Gestione della Manutenzione a Rivarolo. Presso Rivarolo è presente anche il Capo Stazione che sottende alle composizioni e alle manovre. I reparti sono coordinati dal gruppo dirigenziale di GTT – Trasporti presso la sede di Porta Milano (Torino).

PARTE I: Analisi dell'esercizio sulla Ferrovia Canavesana: aspetti normativi, tecnici e metodologici. Studio dell'attività di manutenzione ferroviaria.

1. Il materiale rotabile

1.1. Meccanica della locomozione

1.1.1. La curva caratteristica di trazione

In un sistema di trasporto ferroviario la circolazione avviene su un sistema a guida vincolata, per cui il Macchinista interviene sulla guida del mezzo esclusivamente quanto concerne l'avvio, la velocità, la frenatura e l'arresto. La direzione è vincolata dal tracciato della linea che i treni percorrono, costretti dal vincolo del bordino delle ruote e il fungo della rotaia. In un veicolo, o convoglio, che compie un moto, agiscono due forze principali:

- le forze attive o di trazione *F,*
- le forze passive o resistenze *R.*

Il successo di questo sistema di trasporto deriva dal basso sforzo di trazione che si deve applicare per far avanzare una determinata massa sulle rotaie rispetto ad altre soluzioni. La ferrovia quindi riesce a sfruttare, a parità di massa, sforzi di trazione inferiori o, a parità di sforzi di trazione disponibili, masse maggiori. Ciò si traduce anche in notevoli decrementi di uso di energia, in aggiunta alla scelta di elettrificazione verso cui il mondo dei trasporti è sempre più preponderante.

La forze tangenziali di trazione e frenatura si trasmettono tra ruota e rotaia in virtù dell'aderenza. La condizione di aderenza permane finché la ruota rotola senza strisciare. Aumentando la forza tangenziale il rotolamento continua fino a quando si raggiunge il "limite di aderenza", oltre il quale la ruota comincia a slittare. Tali condizioni di aderenza devono essere soddisfatte anche in frenatura: un eccessivo sforzo frenante induce il "pattinamento" della ruota bloccata sulla rotaia, con la formazione di sfaccettature sul piano di rotolamento. Questo, oltre a costituire un danno con conseguente necessità di riprofilatura della ruota, può indurre la riduzione di velocità dei rotabili fino al loro ritiro dalla circolazione. Le condizioni di aderenza variano notevolmente in funzione dello stato della superficie di contatto e della velocità del mezzo. Come si evince dalla Figura 2, nella quale vengono prese in considerazioni le condizioni tipiche di rotaia asciutta e rotaia umida, il coefficiente di aderenza può subire un decremento notevole che influisce soprattutto nella fase di accelerazione allo spunto.

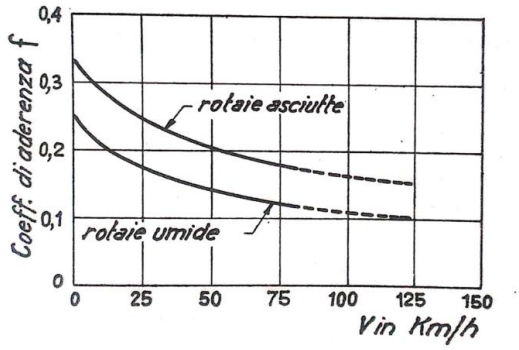


Figura 2 - Valori medi del coefficiente di aderenza in funzione della velocità (Fonte: Vicuna, 1993)

Le resistenze che si oppongono al moto possono essere suddivise in due gruppi: le resistenze ordinarie R_o e le resistenze accidentali R_a. Le prime derivano dal moto stesso del veicolo e sono presenti in qualsiasi condizione plano-altimetrica della linea, le seconde derivano principalmente dalla presenza di curve e livellette. Le resistenze ordinarie comprendono le resistenze dovute alla coppia cinematica al cuscinetto, della coppia ruota-rotaia e delle resistenze all'aria. In letteratura sono proposte numerose formulazioni per definire il valore di queste resistenze, si riportano alcune delle espressioni maggiormente usate in Italia principalmente di tipo empirico. Definendo con r la resistenza specifica [N/kg]:

- per treni viaggiatori leggeri:

$$r_o = 1{,}9 + 2{,}6 \left(\frac{V}{100}\right)^2 \left[\frac{daN}{t}\right] \quad (1.1)$$

- per treni viaggiatori di composizione normale:

$$r_o = 2 + 2{,}8 \left(\frac{V}{100}\right)^2 \left[\frac{daN}{t}\right] \quad (1.2)$$

- per locomotive isolate e treni merci:

$$r_o = 2{,}5 + 3 \left(\frac{V}{100}\right)^2 \left[\frac{daN}{t}\right] \quad (1.3)$$

La resistenza all'aria è, invece, funzione del quadrato della velocità. Essa è legata alla geometria del convoglio: superficie della sezione maestra S, forma del profilo del treno, lunghezza del treno:

$$r_a = k * SV^2 \quad (1.4)$$

Complessivamente può ritenersi dovuta da:

- pressione esercitata sulla testata anteriore del convoglio,

- effetto delle pareti,
- depressione nella parte posteriore del veicolo.

La resistenza aerodinamica è incrementata a seconda della condizione della linea (ad esempio in galleria).

Le resistenze accidentali legate alla pendenza si possono valutare con la seguente formulazione:

$$R_i = P * i \quad (1.5)$$

definendo con *P* il peso del convoglio e con *i* la livelletta, pari al rapporto tra il dislivello *h* per unità di lunghezza orizzontale *l*. (Vicuna, 1993)

Le resistenze dovute alle curve tipicamente sono valutate in ambito ferroviario con la formula di Van Rockl, del tipo:

$$r_c = \frac{a}{R - b} \quad (1.6)$$

I coefficienti assumono i seguenti valori (Tabella 1):

Raggio di curva [m]	*a*	*b*
≥ 350	650	55
350 ÷ 250	650	65
250 ÷ 150	650	30

Tabella 1 - Coefficienti di Van Rockl

In Italia le FS, in seguito ad esperimenti diretti effettuati con il proprio materiale, hanno determinato le resistenze unitarie dovute alle curve, come mostrato in Tabella 2:

R [m]	1000	900	800	700	600	500	450	400	350	300	250	200	180
r_c [daN/t]	0,5	0,6	0,8	1,0	1,2	1,5	1,7	2,0	2,4	2,8	3,4	4,2	4,5

Tabella 2 - Valori medi della resistenza unitaria in curva secondo le FS

Per poter avanzare bisogna applicare al convoglio una forza che vinca le resistenze a cui si accennava poc'anzi. Tale forza è fornita dai motori posti sulle motrici. Ogni mezzo possiede la sua curva caratteristica di trazione *F(V)* che esprime la forza massima *F* da esplicare al variare della velocità *V* (Figura 3).

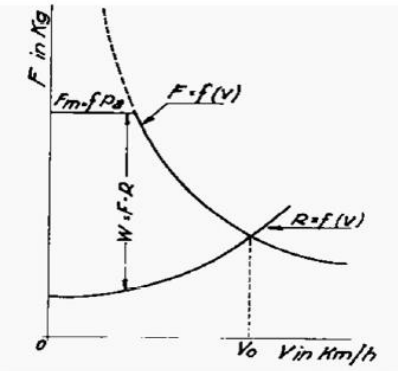


Figura 3 - Curva caratteristica di trazione (Fonte: Vicuna, 1993)

Bisogna prestare attenzione al fatto che, detto *P* il peso aderente che grava sugli assi motori ed *f* il coefficiente di aderenza, deve essere sempre verificata l'espressione:

$$F(V) \leq f(V) * P \quad (1.7)$$

Il coefficiente di aderenza *f* dipende dalle condizioni ambientali e dalla velocità *V*.

Abbiamo quindi visto che sul moto dei veicoli agiscono due insiemi di forze: le forze attive, o di trazione, e le forze passive, o resistenza al moto. Al variare della velocità e della posizione del convoglio sulla linea variano entrambe le forze e, conseguentemente, il convoglio accelera o rallenta a seconda del prevalere di una sull'altra. Nell'esercizio ferroviario sono continuamente mutevoli sia *F*, sia *R*, sia *f*. Considerando un veicolo come una massa uniforme *M* e se si indica con *F* la somma di tutte le forze attive, con *R* la somma di tutte le resistenze, si può scrivere:

$$F = R + M \frac{dv}{dt} \quad (1.8)$$

Un convoglio può quindi accelerare se la forza erogata *F*, che dipende dalla velocità e dal coefficiente di aderenza, supera la resistenza al moto *R*. Tutte le componenti della resistenza si oppongono sempre al moto ad eccezione della pendenza che, per percorsi in discesa, fornisce un contributo attivo. In fase di frenatura, al contrario, i fattori resistenti sono a vantaggio. L'ultima equazione riportata (1.8), derivante dalle II^{A} legge di Newton, descrive le varie fasi del moto che un veicolo può incontrare. Si possono distinguere:

- *fase di avviamento*: la forza attiva *F* è maggiore della resistenza *R*. Il termine $^{dV}/_{dt}$ risulta positivo: l'accelerazione è positiva perciò si ha un aumento di velocità;

- *fase di regime*: la forza attiva *F* uguaglia la resistenza *R*. Il termine $^{dV}/_{dt}$ risulta nullo: l'accelerazione è nulla perciò si ha un moto uniforme;

- *fase di marcia per inerzia (*detta *coasting)*: la forza attiva *F* si annulla. Il termine $^{dV}/_{dt}$ è negativo: si ha una decelerazione e la velocità tende a diminuire per effetto negativo delle resistenze *R*;

- *fase di frenatura*: una forza frenante F_r si aggiunge artificialmente alle resistenze *R* per provocare una decelerazione di maggiore entità rispetto al caso precedente.

1.1.2. Virtualità della linea

Generalmente la somma di $r_c + r_i$, indicata da ora in poi con r_f, viene definita pendenza fittizia; essa descrive le caratteristiche geometriche della linea. Se è presente un intero segmento della linea con valore r_f costante, pur cambiando il valore degli addenti r_c e r_i, si parla di resistenza di trazione costante. La rete italiana è divisa in un certo numero di sezioni con gradi di prestazione costanti, ovvero:

$$r_f = r_i + r_c = costante \quad (1.9)$$

I gradi di prestazione sono 31 e sono riportati nella Tabella 3*:*

Grado di prestazione	$r_i + r_c$ daN/t	Grado di prestazione	$r_i + r_c$ daN/t	Grado di prestazione	$r_i + r_c$ daN/t
1	4,5	12	12,0	23	24,6
2	5,0	13	12,9	24	25,7
3	5,5	14	13,8	25	27,8
4	6,0	15	14,6	26	29,3
5	6,5	16	15,8	27	30,8
6	7,0	17	17,0	28	32,5
7	7,7	18	18,4	29	34,2
8	8,4	19	19,8	30	37,5
9	9,2	20	20,9	31	40,5
10	10,0	21	21,9	—	—
11	11,0	22	22,7	—	—

Tabella 3 - Gradi di prestazione (Fonte: Vicuna, 1993)

Esso è un valido strumento pratico, riportato anche nella Fiancata Principale: documento ad uso dell'esercizio ferroviario che verrà analizzato nel *paragrafo 2.1.2*.

Per rendere fruibile il confronto tra linee diverse si introduce un secondo concetto: la lunghezza virtuale. Ci si riferisce ad un'ipotetica lunghezza in rettifilo e orizzontale (i = 0‰). L'equivalenza tra lunghezza reale e virtuale può essere impostata su diversi parametri, a seconda dell'aspetto che si vuole considerare:

- al lavoro di trazione e quindi all'energia fornita al locomotore,
- alle spese di trazione,
- alle spese di trasporto,
- alle spese di esercizio,

- ai tempi di percorrenza e quindi legato alla velocità di marcia.

Tra di essi ricopre maggiore importanza il primo, nel quale la lunghezza virtuale assume il significato di lunghezza che richiede lo stesso lavoro di trazione necessario per percorrere, a parità di peso trainato, l'unità di lunghezza reale su una linea orizzontale e in rettifilo (Vicuna, 1993). Per definizione si scrive:

$$L_v = L_r \left(1 + \frac{i + r_c}{r_o} \right) \quad (1.10)$$

Si definisce inoltre il grado di virtualità della linea come il rapporto:

$$\frac{L_v}{L_r} \gtreqless 1 \quad (1.11)$$

Tali definizioni sono importanti nell'esercizio ferroviario in quanto condizionano la composizione del treno. La linea reale e la linea virtuale si suppongono esercitate con lo stesso materiale di trazione e rimorchiato con un treno a composizione fissa. Inoltre le linee si suppongono esercitate con la stessa velocità di marcia perciò con la stessa resistenza specifica al moto. Da notare che la lunghezza virtuale si riferisce ad una sola direzione di marcia. Volendo valutare quale effetto ha la lunghezza virtuale agli effetti del tempo di percorrenza, chiamando con S_o la lunghezza del percorso orizzontale e con V_o la velocità corrispondente, si possono confrontare i tempi per superare le due distanze, rispettivamente $t_o = \left(\frac{S_o}{V_o}\right)$ e $t_r = \left(\frac{S_r}{V_r}\right)$ (Vicuna, 1993).

1.2.Sistemi di trazione

Si procederà in questo paragrafo ad illustrare i principali tipi di trazione, fornendo alcuni elementi di confronto tra quelli principalmente usati nella storia delle ferrovie in Italia. Si presenterà un metodo di calcolo per le prestazioni della locomotiva, esso non risulta l'unico in letteratura tuttavia riveste un ruolo utile e veloce volto agli operatori dell'esercizio per determinare le potenze richieste, combinando aspetti tecnici dei veicoli con le caratteristiche della linea. Si lascia al *paragrafo 1.4* la descrizione del treno Ale501-Le220-Ale502 operante nella linea Canavesana e oggetto di analisi nei prossimi capitoli.

I sistemi di trazione adottati sulla rete italiana sono principalmente di tipo elettrico e Diesel. Va specificato fin da subito che gran parte della Rete Nazionale è elettrificata, tuttavia vi sono alcune parti in cui tale ammodernamento non è stato eseguito, perciò è escluso da qualsiasi tipo di trazione di tipo elettrico.

La scelta della tipologia di trazione prende in considerazione sia caratteri tecnici sia caratteri economici, ed influisce su tutti gli aspetti dell'esercizio e del traffico. I motivi di prevalenza del Diesel e dell'elettrico rispetto ad altri sistemi possibili sono legati principalmente alla superiorità di rendimento energetico sia per la possibilità di concentrare una potenza maggiore a parità di dimensioni. Anche se le spese di esercizio per la trazione elettrica sono minori se si guarda solo all'energia e alla manutenzione del materiale rotabile, bisogna considerare la grossa incidenza dei costi fissi di costruzione e manutenzione delle linee, rendendo l'investimento poco conveniente dove il traffico risulta scarso. Se si traccia un grafico qualitativo in funzione dell'entità di traffico delle spese totali di trazione, si nota come l'esercizio in sede elettrificata (T.E.) ha un andamento con pendenza minore tuttavia un'intercetta di notevole entità. Al contrario la trazione Diesel (T.D.) ha una pendenza più marcata a favore di un'intercetta considerevolmente minore (Figura 4).

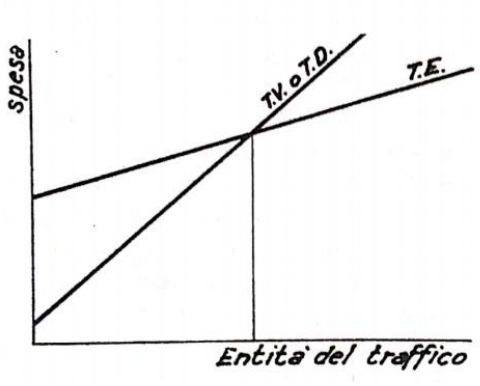


Figura 4 - Andamenti della spesa in funzione del traffico per la trazione elettrica, vapore o Diesel (Fonte: Vicuna, 1993)

1.2.1. Confronto tra i sistemi di trazione

Confronto tra sistemi di trazione in termini di esercizio

Nell'affrontare tale confronto si prende in considerazione anche la trazione a vapore (TV) per comprendere i motivi tecnici del suo abbandono. Uno dei primi aspetti positivi della trazione elettrica e Diesel rispetto al vapore fu sicuramente l'abolizione del fumo, specialmente in galleria. Questo influisce sicuramente sul comfort dei viaggiatori e sulla pulizia dei mezzi. Un ulteriore aspetto legato a questa caratteristica fu l'incremento delle potenzialità della linea: per ragioni di sicurezza bisognava aspettare il diradarsi del fumo prima del passaggio di un secondo mezzo sulla linea e ciò comportava situazioni molto diverse e variabili, oltre a costi legati ad impianti di ventilazione nelle gallerie di notevole lunghezza. Dal punto di vista dimensionale, la locomotiva a vapore comportava un ingombro di notevole entità. La macchina più favorita in quest'ottica è sicuramente quella elettrica che, captando l'energia direttamente dal filo per mezzo di un pantografo, non ha bisogno di spazio per un serbatoio e neanche di continui rifornimenti. Le locomotive elettriche inoltre hanno una caratteristica meccanica che permette uno sforzo di trazione costante su molteplici velocità, e consente forti accelerazioni e velocità anche su tratti acclivi. L'impiego della trazione elettrica consente capacità di trasporto più elevate e migliore rendimento dell'impianto. Tale risultato si ottiene grazie a:

- maggiore massa rimorchiata: nel 1990 per le FS la massa rimorchiata risultava 281t per il Diesel e 515t per l'elettrico,
- una maggiore accelerazione all'avviamento,
- un aumento della velocità media sui tratti acclivi.

Un aspetto non secondario nella scelta è rivestito dalla manutenzione. La percorrenza media nell'intervallo tra due riparazioni fornisce uno strumento utile al confronto in termini di esercizio ed economia al fine per privilegiare un tipo di trazione piuttosto che l'altro (Tabella 4). (Vicuna, 1993)

Percorrenze medie nell'intervallo tra due riparazioni (FS, 1993)	
D341 (RG)	830 000 km
D445 (RG)	989 000 km
E646 (RGM)	1 009 000 km
E 656 (RGM)	1 064 000 km
E 444 (RGM)	1 200 000 km

Tabella 4 - Percorrenze medie tra due riparazioni. D - Diesel; E – Elettrico; RG - Revisione Generale; RGM - Revisione Generale parte Meccanica. (Fonte: FS, 1993)

Confronto tra sistemi di trazione in termini di rendimento

Le cause di perdita di energia tra i tre tipi di trazione sono svariati. Per rendimento totale intendiamo il rapporto fra l'energia ai cerchioni e la quantità di energia originaria. Fra i motori termici, quello Diesel ha rendimento termico maggiore (circa 40%). Per cui, considerando 10000 kcal contenute in 1 kg di gasolio, soltanto 4000 kcal sono effettivamente disponibili ai cerchioni. Comparativamente una locomotiva a vapore presenta un rendimento totale al massimo del 10%, principale motivo del declino di tale sistema di trazione. La trazione elettrica si attesta su un rendimento circa del 25%, rendendoli inferiori al Diesel sotto questo punto di vista.

In carattere più generale, bisogna comunque considerare che non sempre la decisione di elettrificare è motivata dal solo rendimento economico. Bisogna comunque accompagnare tale decisione da un'accurata analisi economica e una studio dei flussi di traffico (Mayer, 1984). In tal senso le amministrazioni pubbliche si avvalgono di analisi costi – benefici per valutare molteplici aspetti riguardanti l'intervento di elettrificazione di una linea e non solo criteri economici. A titolo esemplificativo, la Regione Piemonte ha avviato già nel 2017 dei tavoli di confronti con GTT, gestore dell'infrastruttura, amministrazioni locali, e RFI, soggetto nazionale interessato alla linea, al fine di studiare la possibile elettrificazione dell'ulteriore tratto della Ferrovia Canavesana tra Rivarolo e Pont. Gli elementi a favore dell'investimento sono da ricercare tra vantaggi sopra esposti dell'elettrico rispetto al Diesel, nonché ad un incremento generale della sicurezza d'esercizio. Dall'altra parte, gli elementi a sfavore risiedono nella scarsa domanda di traffico che non giustifica gli alti costi fissi e nell'ipotesi alternativa, ritenuta da alcuni maggiormente attrattiva per l'impiego di risorse e costi, di gestire la tratta tramite bus sostitutivi.

1.2.2. Prestazioni di una locomotiva

Determiniamo ora il procedimento con il quale è possibile calcolare la prestazione di una locomotiva. La procedura mette insieme i concetti di meccanica della locomozione, visti nel *paragrafo 1.1*, e alcuni aspetti tecnici dei locomotori, discussi nel *paragrafo 1.2.1*.

Il treno richiede che la locomotiva posso erogare uno sforzo di trazione necessario per superare:

- la resistenza aerodinamica R_a,
- la resistenza di rotolamento R_1,
- la resistenza dovuta alla pendenza R_2,
- la resistenza dovuta alle curve R_3.

A queste, si andrà ad aggiungere un'ulteriore resistenza, chiamata resistenza equivalente all'accelerazione r_4. Per essa possono essere adottati i valori medi:

Avviamento e basse velocità:

- treni merci pesanti 12 daN/t
- treni viaggiatori 20 daN/t

Velocità massima desiderata:

- treni merci pesanti 2 - 3 daN/t
- treni viaggiatori 3 - 5 daN/t

Si tratta di valori generici, rappresentativi della componente dello sforzo di trazione occorrente affinché il convoglio raggiunga la velocità desiderata in tempi ragionevoli all'avviamento.

Per determinare la potenza del motore occorre innanzitutto determinare lo sforzo di trazione necessario: si esegue la somma di tutti i valori unitari appena citati e si moltiplica per la massa, ottenendo lo sforzo di trazione ai cerchioni:

$$F = (r_1 + r_2 + r_3 + r_4 + r_A) * M \quad [daN] \quad (1.12)$$

La potenza approssimativa della locomotiva può ottenersi attraverso la formula (1.13):

$$P = \frac{(F * V)}{367 * \eta} \quad (1.13)$$

con:

- P: potenza del motore di trazione [kW] ,
- F: sforzo di trazione [daN] ,
- V: velocità [km/h] ,
- η: rendimento [-] ,

il rendimento deriva dalle perdite di trasmissione e, in assenza di dati precisi, è stimato per le locomotrici elettriche a 0,97, varia invece nell'intervallo 0,75 – 0,80 per il Diesel.

Nel tempo sono state rese disponibili dai costruttori o dalle FS delle curve sforzo-trazione caratteristiche per ogni locomotore. Questi strumenti si sono rilevati utili e di immediato utilizzo per l'applicazione della Prefazione Generale all'Orario di Servizio e per la comprensione del materiale rotabile a disposizione dell'impresa (Figura 5)

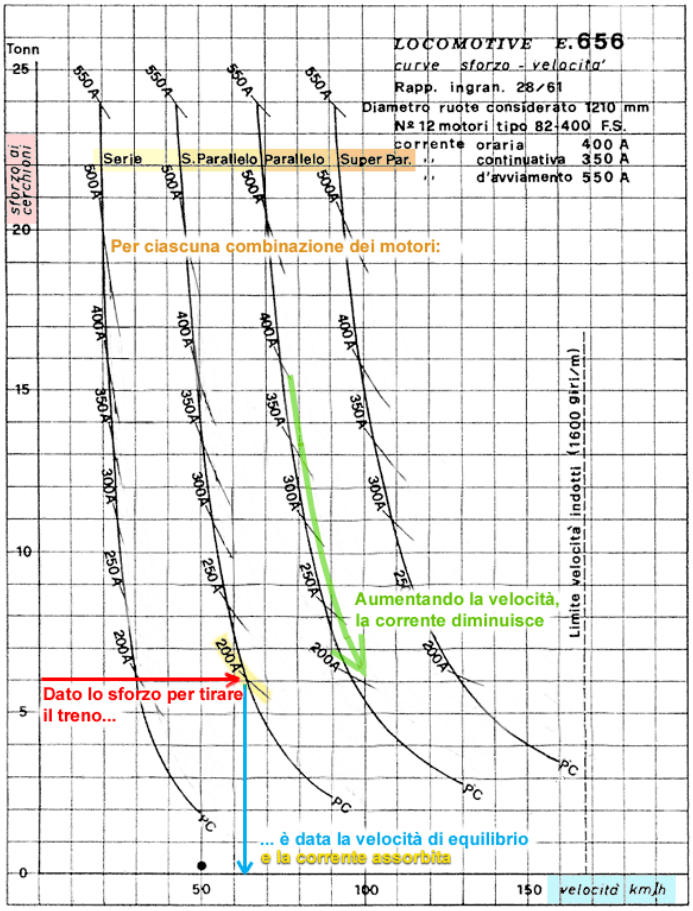


Figura 5 - Curva sforzo - trazione Locomotiva E656 (Fonte: http://www.stagniweb.it/fs104ele.htm)

Attraverso questo abaco si assicura la corretta massa trainata e quindi la giusta composizione del treno rispettando i limiti di tracciato e di trazione del mezzo. Queste conclusioni sono presenti anche, in forma tabellare all'interno della Prefazione all'Orario di Servizio (PGOS); si consiglia dove possibile di eseguire il calcolo con entrambe le strade e valutare la convergenza dei due su un unico risultato. In letteratura sono presenti, inoltre, numerosi abachi a disposizione dell'impresa ferroviaria. Oggi la maggior parte di essi sono sorpassati grazie all'utilizzo di elaboratori informatici e di una grande quantità di dati disponibili. Si cita a titolo di esempio quello proposto da Cavagnaro (1979).

Assicurare la corretta composizione è compito di chi progetta l'esercizio sulla linea. Vedremo nel *paragrafo 2.2* come la PGOS amplia il calcolo della composizione, fornendo maggiori elementi di riflessione che limitano l'assemblaggio dei treni. Si vedrà nello stesso paragrafo un esempio sulla linea SFM1, illustrando anche la semplicità di calcolo che la PGOS ha introdotto rispetto il procedimento illustrato poc'anzi.

1.2.3. Gli organi di rotolamento

Prende il nome di "rodiggio" l'insieme della sala montata, delle boccole e degli accessori necessari a garantire il rotolamento. In particolare la sala montata è composta da una coppia di ruote collegate mediante un assile, sul quale viene scaricato il peso. Le principali mansioni del rodiggio sono:

- trasmissione dei carichi sulle ruote e successivamente sulle rotaie,
- conduzione del mezzo sui binari,
- smorzamento delle oscillazioni,
- applicazione della trazione e della frenatura.

Verranno presentate nei seguenti paragrafi le parti meccaniche fondamentali per garantire il rotolamento.

Sala montata

Essa è composta da una coppia di ruote rigidamente connesse mediante un assile. La sala montata presenta svariate versioni a seconda della tipologia di trazione, si può comunque classificare in motrice, accoppiata o portante a seconda della funzione che riveste nel convoglio. Nella sala montata si posizionano anche i dischi freno e la ruota condotta.

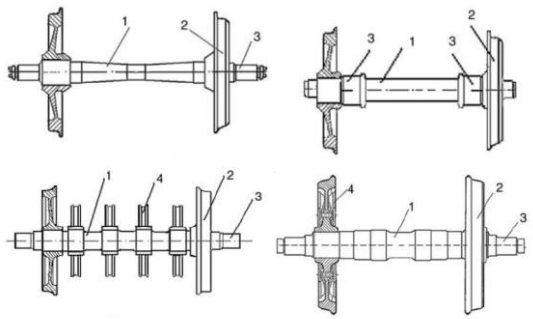


Figura 6 - Sala montata: a) con boccole esterne b) con boccole interne c) con dischi freno sull'assile d) con dischi freno sulla ruota. (1 assile; 2 ruota; 3 boccola; 4 disco freno) (Fonte: Toneatto, 2019)

La sala è funzione dello scartamento nel quale opera, quello standard europeo è di 1435 mm. Lo scartamento può subire leggere variazioni in curva (alcuni millimetri) per questioni di equilibrio tra ruota esterna ed interna e quindi garantire maggiore stabilità.

L'assile

Nell'assile vengono calettate mediante una pressa, o a freddo o a caldo, le ruote. Esso ha il compito di distribuire il carico delle masse sospese sulle ruote. Costituito da acciaio bonificato come prescritto nella UIC 811. Sono usati trattamenti particolari come la brunitura, la nitrurazione e la brillatura per aumentare la resistenza a fatica. Alle estremità dell'assile sono presenti i fuselli su cui

sono inserite le boccole alle quali è affidato, insieme alla sospensione primaria, l'appoggio del carrello.

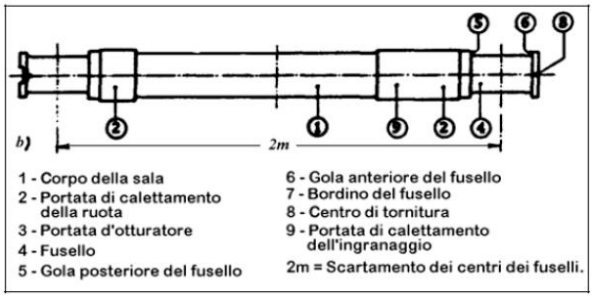


Figura 7 - Assile (Fonte: Toneatto, 2019)

Le boccole

Sono responsabili del collegamento tra assile e telaio tramite le sospensioni. È inoltre affidata alle boccole la trasmissione degli sforzi necessari per il moto (trazione e frenatura) e la rotazione relativa tra l'assile e le masse sospese. Nel trasporto passeggeri la principale tipologia di boccole è con cuscinetti a rotolamento: sono più complesse e costose ma forniscono bassi valori di attrito per garantire alte velocità.

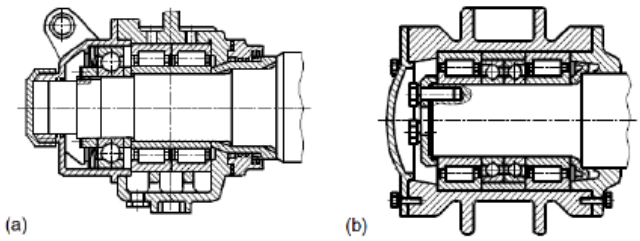


Figura 8 - Boccole (Fonte: Toneatto, 2019)

La ruota

La forma della ruota è tipicamente troncoconica e generalmente nei veicoli ferroviari è di tipo monoblocco, costituito da tre parti: la corona (parte esterna che comprende anche il bordino o flangia), il disco centrale e il mozzo ruota (parte centrale che collega la ruota stessa con l'assile). Il disco centrale è caratterizzato dalla forma a vela che diminuisce le vibrazioni e alleggerisce il carico totale in quanto di forma più snella. Tra il disco e il mozzo è presente un canale per l'olio ad alta pressione per lo scalettamento della ruota durante la manutenzione o la sostituzione.

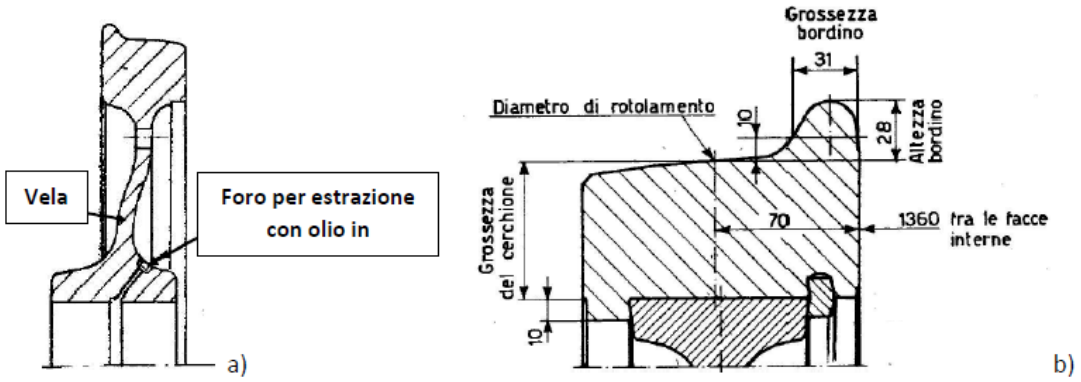


Figura 9 - Ruota monoblocco (a) e cerchiata (b) (Fonte: Toneatto, 2019)

Il diametro della ruota è compreso tra 0,9 e 1,4 m. Per ogni tipologia di ruota esistono intervalli di diametro minimo ammissibile raggiungibile per successiva riprofilatura al tornio (*paragrafo 4.4*). Raggiunta tale misurazione, denominata linea di fede, la ruota dovrà necessariamente essere sostituita. Il cerchione, costituito da acciaio a resistenza migliorata, è la parte maggiormente sollecitata ad usura. Per il profilo della ruota vengono individuate delle misure caratteristiche da tenere in osservazione: circolo di rotolamento, dimensioni del cerchione, dimensioni del bordino e conicità.

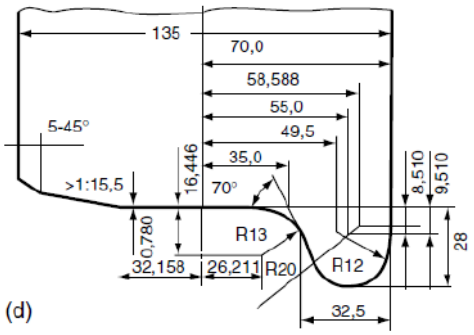


Figura 10 - Profilo della ruota adottato in UE (Fonte: Di Majo, 1979)

- circolo di rotolamento: è identificato con la sezione verticale misurata dal punto di contatto. Si identifica con esso un diametro nominale. Nella tipologia di ruote a profilo FF.SS. la sezione dista 70 mm dalla parte interna (Figura 11).
- bordino (o flangia): costituito dalla parte interna, ha il compito di impedire lo svio e di guidare il veicolo. L'usura della ruota produce un aumento dell'altezza del bordino, con conseguente aumento dell'angolo di inclinazione. Insieme alla grossezza del bordino, sono i tre parametri fondamentali da controllare durante l'ispezione manutentiva per stabilire il raggiungimento del limite di usura. La grossezza del bordino varia da 32,5 mm (ruota nuova) a 20 mm (limite per la decisione di sostituzione della ruota). L'altezza

del bordino varia da 28 mm (ruota nuova) a 36 mm (limite per usura) (Figura 10 e Figura 11). Particolare importanza riveste il parametro q_R (Figura 11) ovvero la quota rappresentativa del corretto profilo del bordino (vedi *paragrafo 4.4*).

- dimensione del cerchione: nella ruota a profilo tipo FF.SS. è misurata a 10 mm sopra il diametro interno (Figura 11).
- conicità: in Italia il profilo ha un'inclinazione di 1/20 sulla superficie di rotolamento.

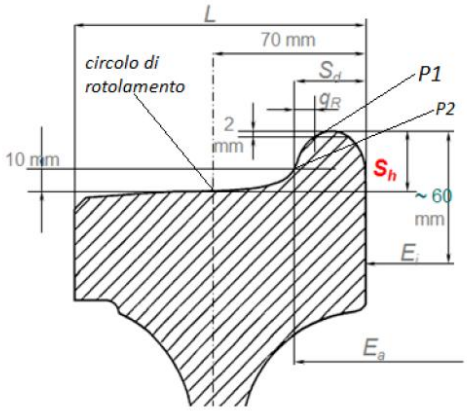


Figura 11 - Principali quote di riferimento per la misurazione della ruota in fase manutentive (Fonte: UIC 811)

1.3. I sistemi di frenatura

Si dedica ora spazio alla descrizione del sistema frenante, sia illustrando la fisica del processo sia descrivendo le diverse tecnologia e i requisiti necessari per il corretto funzionamento e la sicurezza. Tali aspetti risultano in prima istanza scollegati dall'esercizio ferroviario tuttavia la conoscenza degli spazi d'arresto e dei dispositivi installati sui convogli sono di notevole importanza nella decisione di composizione e impongono limiti molto stringenti nella Prefazione Generale all'Orario di Servizio. Nel *paragrafo 2.2* e nel *capitolo 3*, durante l'analisi dettagliata degli articoli della PGOS e del segnalamento ferroviario, si farà riferimento più volte ai sistemi di frenatura, perciò risulta necessario un approfondimento su tale tema, proposto nel presente paragrafo.

I treni sono dotati di freni che consentono l'arresto in spazi prestabiliti, dipendenti dalla tipologia di segnalamento installato sulla linea. Il problema risulta particolarmente importante date le masse in gioco. Vedremo le tecnologie messe a disposizione per garantire la sicurezza e il corretto rispetto dei limiti di velocità da parte dei Macchinisti al fine di eseguire le corrette procedure di frenatura. Prendendo in considerazione uno degli assi, su di esso grava un peso P e uno sforzo radiale applicato al ceppo pari a Q (Figura 12). Per effetto dello sforzo Q nasce nella periferia del cerchione uno sforzo di attrito Φ, diretto in senso contrario al moto, di valore pari al prodotto tra la forza Q e il coefficiente di attrito f fra zoccolo e cerchione:

$$\emptyset = f * Q \quad (1.14)$$

Φ rappresenta lo sforzo frenante esercitato sull'asse.

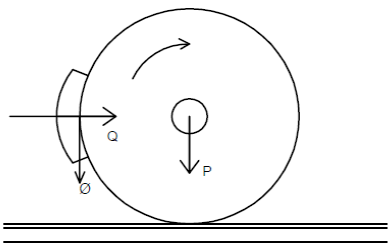


Figura 12 - Asse frenato

Per salvaguardare il rotolamento, ovvero non avere una ruota bloccata che pattina sulla rotaia, è necessario che lo sforzo frenante sia inferiore al limite di aderenza, pari al prodotto tra peso dell'asse e coefficiente di aderenza:

$$\emptyset = f * Q \ \leq f' * P \ \ (1.15)$$

Indicando con *f* il coefficiente di attrito ceppo-cerchione ed *f'* il coefficiente di aderenza ruota-rotaia. Si ricava che:

$$\frac{Q}{P} = \frac{f'}{f} \quad (1.16)$$

Il rapporto massimo tra la forza applicata al ceppo e il peso dell'asse può al massimo eguagliare il rapporto tra i coefficienti di aderenza, che sono entrambi funzione della velocità (Figura 13):

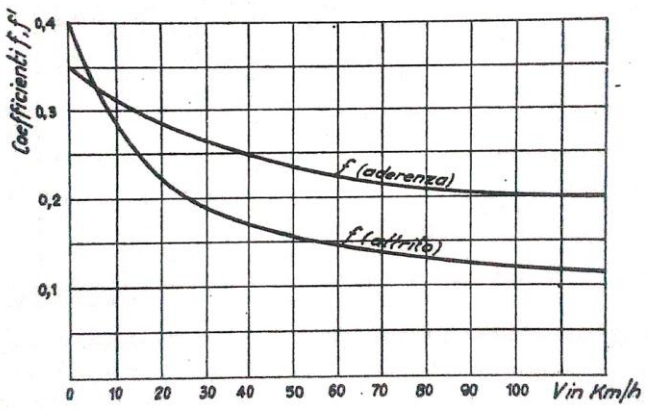


Figura 13 - Coefficienti di attrito ruota-rotaia e di attrito ceppo-cerchione in relazione alla velocità (Fonte: Vicuna. 1993)

Un freno ideale quindi dovrebbe modificare il rapporto *Q/P* con il variare della velocità, ma ciò non si realizza con i normali freni adottati in ferrovia (Vicuna, 1993). Si sono dovuti adottare sui freni a ceppi dispositivi a due stadi di pressione, al fine di evitare l'imposizione di rapporti *Q/P* troppo elevati. Per superare gli ulteriori problemi dei freni a ceppi, si sono adottati in epoca più moderna freni a disco, realizzando coefficienti di attrito indipendenti dalle velocità. Lo spazio di frenatura si ottiene dall'equazione (1.8), invertendola e aggiungendo il termine legato alla forza di frenatura F_r. Esprimendo *dv/dt* come d^2s/dt^2, si ricava:

$$ds = \frac{-M\ v\ dv}{R_o + i + F_r} \quad (2.17)$$

La quale, per integrazione, fornisce:

$$s = -M \int_V^0 \frac{v\ dv}{R_o + i + F_r} \quad (2.18)$$

Essa risulta di difficile applicazione, perciò si ricorre spesso all'utilizzo di formule empiriche o diagrammi, come quello proposto in Figura 14:

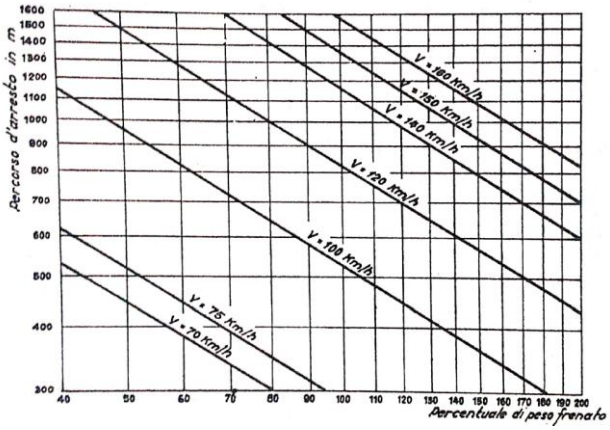


Figura 14 - Percorso di arresto in funzione della percentuale di peso frenato e della velocità su linea orizzontale (Fonte: Vicuna, 1993)

Le Fiche UIC 541 OR, UIC 543 e UIC 549 stabiliscono le prescrizioni relative ai sistemi di frenatura e i principali requisiti di sicurezza da osservare per le varie tipologie di freno. Esse stabiliscono che il freno deve essere ad aria compressa, automatico ed a una sola condotta. Esso deve essere messo in azione per mezzo della variazione di pressione nella condotta. Sono ammessi ulteriori comandi ai freni come l'impiego dell'energia elettrica. Quando si frena si provoca, a partire dal rubinetto del macchinista, una rapida caduta di pressione, originando un'onda che si propaga all'interno della condotta. Il fronte d'onda si degrada con il progredire del suo moto, la UIC 540 fissa perciò un limite minimo di 250 m/s per la velocità di propagazione e una pressione di 5 bar al fine di riuscire a far percorrere a tale onda l'intera condotta fino agli ultimi convogli, che altrimenti risulterebbero non frenati e porterebbero un aggravio nella parte anteriore del treno. Oltre a funzionare ad aria compressa (il sistema frenante è pneumatico), i requisiti di sicurezza richiesti ad un treno sono:

- continuità: il freno è comandato dal locomotore e si sviluppa lungo tutto il convoglio grazie ad una condotta,
- automaticità: il freno deve entrare in azione anche senza l'intervento del macchinista in caso di discontinuità della condotta,
- gradualità: l'azione frenante è moderabile per rispondere alle diverse esigenze della fase di frenatura,
- inesauribilità: consente la sfrenatura solo quando la pressione in condotta è risalita al valore prossimo a quello di regime (5 bar ± 15%) ed è quindi possibile una nuova frenatura.

Il freno continuo può essere schematizzato nelle sue componenti principali come segue in Figura 15:

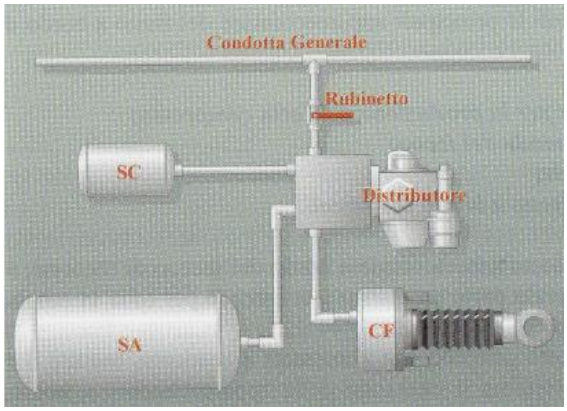


Figura 15 - Schema delle componenti del sistema frenante continuo (Fonte: Dalla Chiara, 2012)

- la condotta generale: rappresenta l'organo di comando,
- il distributore: rappresenta l'organo decisionale che pilotato dalla pressione comanda la frenatura comparando la pressione nella condotta e nel serbatoio,
- il serbatoio di comando: rappresenta l'organo di memorizzazione della pressione nella condotta,
- il serbatoio ausiliario: trasmette aria precedentemente accumulata agli organi di azionamento,
- i cilindri del freno: organi di azionamento che intervengono quando l'organo decisionale prescrive l'azione frenante. (Dalla Chiara, 2012)

Esistono inoltre diversi regimi: quello di tipo viaggiatori in cui la pressione nei cilindri aumenta o diminuisce rapidamente (massimo 5 s in frenatura, 20 s in sfrenatura). Esso è adatto alle elevate velocità dei treni viaggiatori. Il valore di azionamento della frenatura è quasi uguale per tutte le carrozze, tuttavia nella PGOS la massima composizione rispetto la frenatura è limitata a 120 assi. Invece il regime tipo merci, dopo un valore iniziale di frenatura molto rapido, raggiunge lentamente il suo valore massimo (30s in frenatura, 60s in sfrenatura), riducendo gli urti e compatibili con le elevate lunghezze di composizione dei convogli merci. Nelle carrozze adibite al trasporto viaggiatori, non si ha una differenza di peso tra la configurazione carica e vuota: le caratteristiche del freno sono calcolate sulla tara del veicolo. Al contrario i treni merci variano notevolmente in composizione vuota o carica, dovendo di conseguenza modulare il rapporto Q/P . A tal proposito i convogli sono muniti di un dispositivo che calibra la frenatura o a regime di carro vuoto o a regime con carico medio. Nei treni passeggeri si inserisce, insieme al freno continuo, un freno di tipo elettrico. Esso si basa sull'utilizzo di motori di trazione della locomotiva.

Si illustrano ora alcune definizioni utili nell'esercizio quotidiano di un'impresa ferroviaria e presenti nella PGOS. Nelle Fiancate Principali (*paragrafo 2.1*) sono indicati i gradi di frenatura

della linea che, accoppiati alle caratteristiche del sistema franante, imporranno limitazioni di composizione e velocità.

- peso frenato dei rotabili: descrive la capacità frenante del convoglio. La capacità frenante è pari al peso frenato attribuito al convoglio espresso in tonnellate. Il peso frenato può essere inferiore, uguale o superiore al peso reale del convoglio: esso è determinato sperimentalmente dalle case produttrici secondo normativa UIC. Esso è indicato sulla fiancata della cassa, dopo la sigla del freno utilizzato. Si trovano anche riferimenti ai valori dei principali convogli usati nella Tabella C della PGOS.
- peso da frenare: risulta pari alla somma dei pesi lordi, ovvero peso tara + carico ammissibile, di tutti i rotabili usati nella composizione.
- peso frenato dei treni: pari alla somma del peso frenato dei rotabili presenti nella composizione e collegati alla condotta generale del freno. Le locomotive non collegate con la condotta non rientrano in tale computo. Il peso frenato occorrente viene valutato in relazione ai gradi di frenatura della linea e alla velocità del treno, come si vedrà nelle tabelle A e B della PGOS.

1.4. Ale 501 – Le 220 – Ale 502

Figura 16 - Ale501 - Le220 - Ale502 in dotazione a GTT sulla ferrovia Canavesana

L'oggetto di studio saranno i convogli in dotazione a GTT sulla linea SFM1 denominati Ale501 – Le220 – Ale502 (Figura 16) (Aln501-Ln220-Aln502 in versione termica). Sono elettromotrici moderne, costituite da tre elementi scindibili solo in officina. Dotate di accoppiatore Sharfenberg esse possono essere riunite in più convogli comandati da un solo macchinista.

Progettati da Alstom Ferroviaria a Savigliano, fanno parte della piattaforma "Coradian Meridian", di cui appartengono anche i più moderni ETR denominati "Jazz" e "Pop". Progettati tra gli anni 2001 – 2004, sono entrati in servizio nel 2004 per un totale di 248 convogli in circolazione nel 2019 in Italia. Le imprese alle quali sono stati venduti tali veicoli sono:

- 100 per Trenitalia,
- 19 per GTT,
- 6 per FAS,
- 4 per TFT,
- 4 per FCU.

Sono treni concepiti in composizione bloccata, separabili esclusivamente in condizioni particolari o per manutenzione, composti da una cabina di guida (Ale 501), una carrozza centrale (Le 220) e una cabina di testata (Ale 502). Si riportano le principali caratteristiche tecniche e dimensioni per il singolo convoglio:

Convoglio Ale501-Le220-Ale502	
Lunghezza	51900 mm
Larghezza	2950 mm
Altezza	3820 mm
Capacità	24 posti (I^A classe) + 122 posti (II^A classe) + 23 strapuntini + 1 posto disabili + 179 posti in piedi (considerando l'occupazione di quattro persone ogni m^2)
Passo dei carrelli	2800 mm
Massa a vuoto	92 t
Massa aderente	60 t
Rodiggio	Bo'2'2'Bo'
Potenza oraria	1250 kW
Velocità massima	160 km/h
Alimentazione	3 kW CC, 1,5 kW CC
Diametro delle ruote	850 mm
Frenatura	Elettrica a recupero e reostatica
Prezzo	3,5 milioni €

Tabella 5 - Convoglio Ale501 - Le220 - Ale502 caratteristiche tecniche (Fonte: Alstom Ferroviaria, 2011)

Il treno è costituito dal 50% in acciaio (54 t), 2 t di vernice e 220 m^2 di pellicolatura antigraffiti. Gli impianti richiedono 760 m di tubazioni, 200 m di lampade lineari, 34000 m di cavi elettrici e 40 computer. L'assemblaggio in officina richiede 55 giorni di lavoro per una squadra composta da 60 persone, con un ritmo di officina pari a 4 treni al mese (Wikipedia, 2019). Il treno è climatizzato, elemento di principale novità rispetto ai treni storici usati sulla tratta Rivarolo – Chieri. La pavimentazione è ribassata a 600 mm sul piano del ferro per facilitare l'incarozzamento dei passeggi attraverso 3 ampie porte per fiancata, con l'obiettivo di diminuire i tempi di attesa in stazione e agevolare il comfort per l'utenza. La struttura della cassa risponde alla sagoma limite della Fiche UIC 505-1 rispettando la limitazione sul massimo carico per asse di 16 t. I treni sono dotati di ampia circolabilità interna grazie a corridoi larghi nelle zone di intercomunicazione (600 mm) e fra i sedili (610 mm). Un ulteriore elemento di comfort è dato dalla bassa rumorosità del complesso a seguito della soluzione di isolamento termoacustico. Il complesso è equipaggiato con due carrelli motore passo 2400 mm posti in corrispondenza delle intercomunicanti. Denominando:

- "A" = n° 1 veicolo motore di testa di 1ª classe;
- "M" = n° 1 veicolo rimorchiato di 2ª classe;
- "B" = n° 1 veicolo motore di testa di 2ª classe;

il complesso può presentare le seguenti composizioni:

- (A + M + B)
- (A + M + B) + (A + M + B)
- (A + M + B) + (A + M + B) + (A + M + B)

L'azione di trazione è garantito da 2 pantografi che alimentano l'intero complesso e 4 motori asincroni trifase auto ventilati. L'intera catena di trazione è posta sul tetto del veicolo (Figura 17): tale elemento ha rivestito una delle principali criticità nell'officina di manutenzione di Rivarolo, non dotata di carri ponte per la lavorazione sopra al mezzo. A seguito di un investimento aziendale si sono dotati due dei tre binari dedicati alle manutenzione di impalcati appositi per lavorare su questi convogli. Si vedrà nella fase simulativa come questo costituisce un collo di bottiglia nel processo manutentivo di questi TTR.

Figura 17 - Catena di trazione

Le cabine di guida, una per ogni motrice di estremità, sono climatizzate ed equipaggiate con telefono di servizio, apparati di sicurezza, sistema di controllo incarozzamento tramite telecamere, idonea alla condotta sia in doppio sia in singolo agente. Il convoglio è il primo in Italia ad avere in servizio un sistema di videosorveglianza (Alstom, 2011).

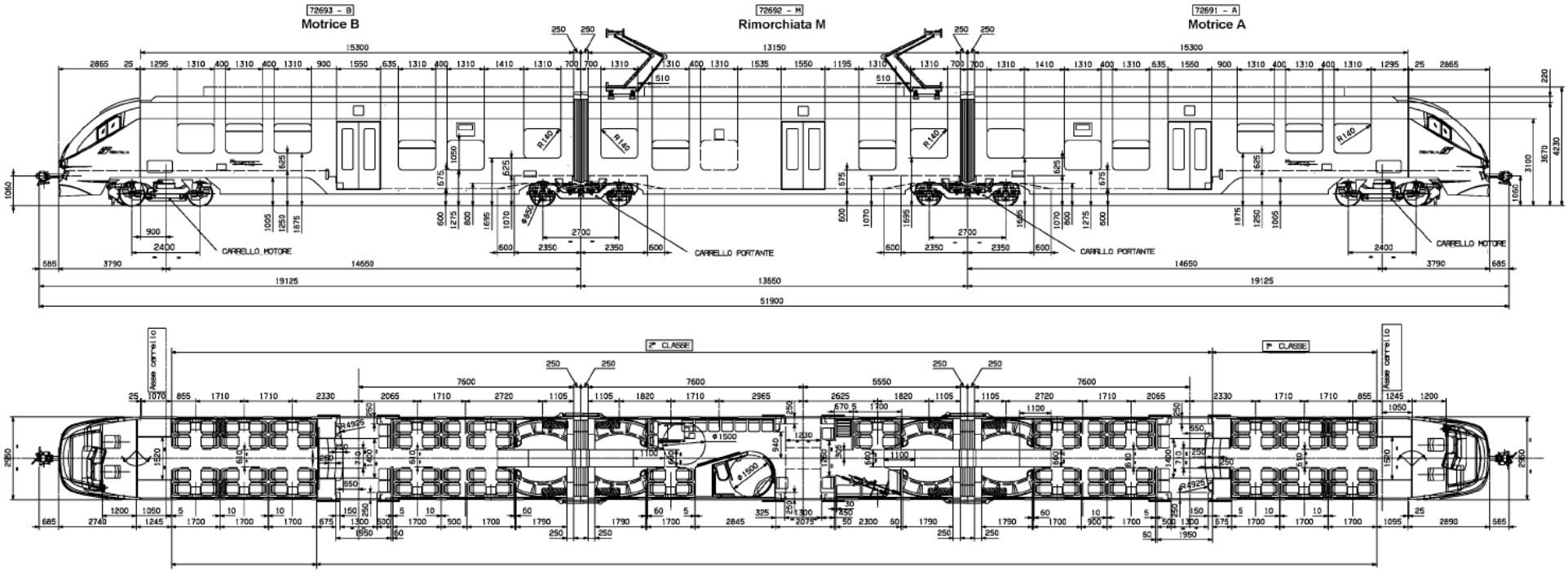


Figura 18 - Principali dimensioni del convoglio Ale501-Le220-Ale50 (Fonte: Alstom, 2011)

2. Regolamentazione e organizzazione dell'esercizio ferroviario

Ogni sistema di trasporto necessita di un'idonea progettazione affiancata da particolari tecnologie al fine di assicurare adeguati livelli di sicurezza e di esercizio. Mentre per la strada si conta sulla capacità dei singoli e sull'osservanza da parte di ogni guidatore del "Codice della strada", nel campo ferroviario si assiste alla formazione di personale specializzato che sottende alla circolazione secondo procedure dettate nella "Regolamentazione dell'esercizio ferroviario". Attualmente la scelta del trasporto ferroviario rimane una valida alternativa sia in ambito di sicurezza, soprattutto confrontandolo con il caso stradale, sia per i volumi trasportati in un'unica soluzione. Oggi la ferrovia riveste anche un ruolo chiave nella scelta ecologica avendo principalmente a disposizione energia elettrica meno inquinante. A questi aspetti si lega il comfort del viaggiatore che, non dovendo prestare attenzione alla guida, può spendere il tempo di viaggio in altre attività e svincolandosi, salvo una corretta gestione dell'esercizio, da intasamenti di traffico sempre più diffusi nel trasporto stradale. (Franceschini et al., 2019).

Concentrandosi sul trasporto passeggeri, le principali caratteristiche che influenzano l'utenza nella scelta del mezzo di trasporto sono: il tempo impiegato da origine a destinazione, in genere vantaggioso nel caso ferroviario per medie e lunghe distanze, la sicurezza, la regolarità del servizio offerto e i costi. Prendendo in considerazione questi aspetti si può notare come la scelta stradale e ferroviaria risultano entrambe di notevole importanza, perciò non si può pensare di escludere totalmente l'una piuttosto che l'altra. Una voce importante emersa negli ultimi anni è legata ai "costi esterni" (inquinamento, congestione, incidentalità, ecc.). La Tabella 6 conferma il vantaggio della ferrovia, nella quale rivestono circa l'1,3% del costo totale, rispetto la strada nella quale coprono il 94,4% del costo complessivo (Ferrovie dello Stato, 2005). Essi rivestono un ruolo sempre più preponderante nell'azione politica dei Paesi.

	Gas serra	Inquinamento atmosferico	Rumore	Incidenti	Congestione	TOTALE	(%)
STRADA	**2.408**	**7.277**	**5.224**	**3.941**	**19.435**	**38.285**	**94,4**
Trasporto passeggeri	**1.606**	**4.329**	**2.599**	**3.599**	**13.087**	**25.220**	**62,2**
Uso privato	1.536	3.997	2.414	3.563	12.679	24.189	59,6
Autovetture	*1.451*	*3.323*	*1.547*	*2.546*	*12.679*	*21.546*	*53,1*
Motocicli	*48*	*179*	*516*	*551*	-	*1.295*	*3,2*
Ciclomotori	*37*	*495*	*350*	*466*	-	*1.348*	*3,3*
Uso collettivo - Bus e pullman	70	331	185	36	408	1.031	2,5
Trasporto merci	**801**	**2.949**	**2.625**	**341**	**6.348**	**13.065**	**32,2**
Veicoli leggeri	280	948	1.108	40	2.647	5.023	12,4
Veicoli pesanti	521	2.000	1.517	301	3.701	8.042	19,8
ROTAIA	**58**	**123**	**235**	**35**	**97**	**547**	**1,3**
Trasporto passeggeri	**40**	**94**	**140**	**31**	**97**	**402**	**1,0**
Trasporto merci	**18**	**29**	**95**	**3**	-	**145**	**0,4**
AEREO	**609**	**581**	**440**	**29**	**74**	**1.734**	**4,3**
Trasporto passeggeri	**567**	**540**	**408**	**29**	**74**	**1.620**	**4,0**
Trasporto merci	**42**	**40**	**32**	-	-	**114**	**0,3**
TOTALE GENERALE	**3.075**	**7.981**	**5.899**	**4.005**	**19.606**	**40.566**	**100,0**

Tabella 6 - Costi esterni imputabili alla mobilità (Fonte: Ferrovie dello Stato, 2005)

2.1. Panoramica generale dell'esercizio ferroviario

2.1.1. Caratteristiche del trasporto viaggiatori

La principale missione di un'impresa ferroviaria locale è il trasporto passeggeri per mezzo di veicoli circolanti su rotaia. Inizialmente ci soffermiamo su uno degli aspetti che interessa da vicino l'azienda: la qualità del servizio offerto. In passato le Ferrovie dello Stato (FS) operavano in regime di monopolio sul mercato (sia come Gestore dell'Infrastruttura sia come Operatore dell'Esercizio), perciò l'attenzione allo standard offerto ai propri passeggeri risultava di minore importanza per l'azienda. Dopo la direttiva Europea 91/440/CEE del 29 luglio 1991, e il conseguente recepimento da parte dello Stato Italiano, la situazione mutò fino alla configurazione attuale, nella quale l'utente ha una più vasta scelta sul mercato dei trasporti. La nascita di ulteriori Imprese Ferroviarie private o partecipate ha innalzato l'attenzione verso un sistema di trasporto di elevata qualità. Questo processo è più marcato nell'ambito dell'Alta Velocità, meno nel trasporto Regionale e Metropolitano. Si possono comunque individuare alcuni tratti peculiari del livello offerto nel trasporto ferroviario:

Rispondenza alle esigenze di traffico: esso è sicuramente un requisito intrinseco del trasporto ferroviario, che lo caratterizza come strumento di interesse pubblico per lo spostamento. Non sempre si riesce a soddisfare questa esigenza ma l'impegno delle azienda è quello di impegnare i propri sforzi nell'offrire un servizio adeguato al flusso di utenza. Il tempo di esecuzione deve risultare il più piccolo possibile, offrendo una soluzione competitiva rispetto lo spostamento stradale. Il tempo riveste un ruolo di primaria importanza nel campo ferroviario, influenzando l'esecuzione stessa delle corse.

Affidabilità della programmazione: l'informazione dell'orario all'utenza, stabilita in opportuni documenti di esercizio, sono vincolanti al fine di assicurare un servizio di qualità. Se il grafico della circolazione effettiva non si conforma con quello programmatico, dimostra che vi sono delle inadeguatezze nell'esercizio o nella sua programmazione, che occorre eliminare. Grazie agli investimenti rivolti al potenziamento infrastrutturale dei nodi e alla costruzione di linee ad Alta Velocità, che ha consentito di differenziare l'offerta tra i traffici di diverse tipologie, l'affidabilità complessiva è migliorata. Ulteriori contributi sono dati dalla specializzazione del materiale rotabile ai vari servizi e dal ruolo del Gestore dell'Infrastruttura e delle Imprese Ferroviarie.

Capacità di traffico: esso risulta un elemento di grande vantaggio rispetto qualsiasi altro mezzo di trasporto terrestre. Soltanto la Ferrovia è capace di far fronte nel settore viaggiatori di trasporti di

massa nelle grandi città. Se si dovesse assicurare con mezzi stradali lo spostamento di un egual numero di persone, si incontrerebbero difficoltà difficilmente superabili. (Vicuna, 1993)

La sicurezza: la sicurezza che caratterizza il trasporto su rotaia non è un fattore scontato nel sistema ferroviario, ma deriva dalle continue cure e dai continui investimenti che le azienda del settore dedicano a questo tema. Gli incidenti ferroviari destano, però, sempre tanta attenzione da parte dell'opinione pubblica. La popolazione è largamente coinvolta per l'andamento di un servizio di largo interesse come quello ferroviario. È da considerare anche un fattore psicologico, che attribuisce al singolo caso un peso maggiore per la rarità dell'evento e non considerando il grande numero di casi di altri sistemi di trasporto, come quello stradale, che tuttavia si verificano in maniera più frequente e che complessivamente comprende più utenza. Benché in Italia il numero di incidenti rapportati ai chilometri percorsi sia in aumento negli ultimi anni (Figura 19), essi sono dovuti specialmente a persone non autorizzate alla sede ferroviaria (per gli anno 2016, 2017 e 2018 rispettivamente 72, 70 e 79 incidenti). Nel contempo si registra una notevole diminuzione di incidenti laddove siano stati presi seri interventi di riqualificazione e moderamento diretti da ANSF (*capitolo 3*), soprattutto riguardante passaggi a livello e segnalamento; dimostrazione che devono pertanto ricercarsi soluzioni in ambiti non esclusivamente ferroviari. Complessivamente dati molto inferiori al tasso stradale dove il tasso degli incidenti per chilometro si attesta su un valore pressoché costante negli ultimi anni pari a 0,68 (Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, 2018).

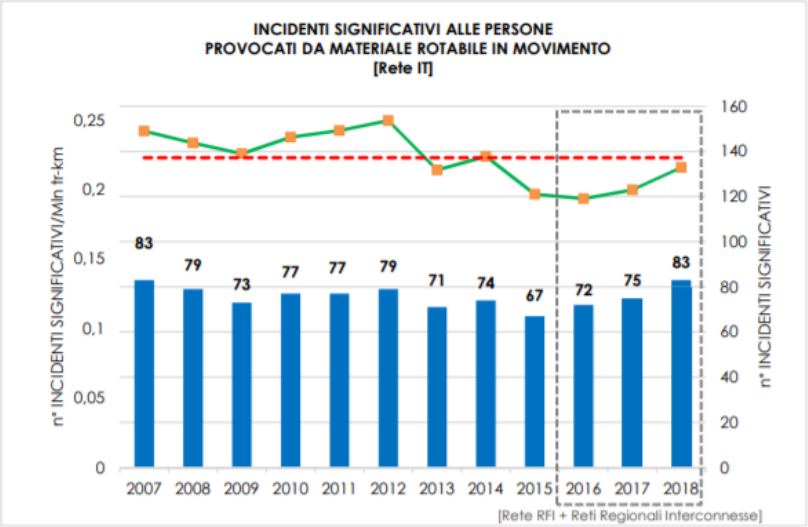


Figura 19 – Incidentalità ferroviaria (Fonte: ANSF, 2018)

Comfort: Come già accennato in precedenza, un'altra peculiarità del trasporto viaggiatori è il comfort. Esso dipende principalmente dal materiale rotabile utilizzato, dalle condizioni di manutenzione e dallo stato della via. Esiste una grande scelta di materiale rotabile per viaggiatori

da parte dell'azienda, questo permette di scegliere quello più idoneo alle varie esigenze nel rispetto delle velocità ammesse sull'infrastruttura e i parametri di sicurezza imposti dalle normative vigenti. È indispensabile che i pianificatori dell'esercizio programmino in modo corretto la velocità d'esercizio in relazione alle esigenze tecniche della ferrovia sulla quale operano.

Costo del viaggio: Un ulteriore aspetto di primaria importanza è il sistema tariffario adottato. Il costo del viaggio per il sistema ferroviario è frutto di complessi calcoli che prendono in considerazione sia i costi supportati dall'azienda per l'effettuazione del servizio sia tutte le necessità organizzative interne. Riguardo al trasporto viaggiatori bisogna prendere in considerazione anche l'aspetto sociale del servizio erogato, non perdendo di vista l'esigenza storica di venire incontro alle categorie della popolazione meno agiate. Ogni servizio richiesto all'azienda ha come oggetto un "contratto di trasporto" rappresentato per i viaggiatori dal titolo, o più comunemente biglietto, di viaggio. Una delibera del CIPE[3] del 1996 ha stabilito il prezzo del biglietto ferroviario articolandolo in tre componenti fondamentali: la tariffa base, legata al chilometraggio percorso durante il viaggio, i supplementi di servizio, determinati in base alla qualità dell'offerta, e la regressività rispetto la distanza percorsa. A tale delibera si aggiunsero successive modifiche che tengono in considerazione le condizioni del mercato sulla relazione tra origine e destinazione, della velocità commerciale del servizio, sulla puntualità, sulla frequenza e sul comfort. Inoltre l'ingresso sul mercato di nuovi operatori concorrenti ha reso necessaria la divisione del trasporto viaggiatori in:

- trasporto metropolitano e regionale: nel quale il livello tariffario è stabilito dalle Regioni,
- trasporto di media e lunga percorrenza: nel quale si valuta più approfonditamente la legge di mercato e l'evoluzione della domanda nella tratta.

Un'ulteriore modifica recente al sistema tariffario deriva dall'individuazione dell'importanza della linea, considerandone la rispettiva importanza nei confronti della Rete Nazionale. Questa nuova impostazione tende al pareggio di bilancio tra costi e ricavi dell'azienda. La divisione dei mercati nel trasporto passeggeri è sottoposta alla seguente normativa (Franceschini et al., 2019):

- per il trasporto metropolitano e regionale le tariffe sono stabilite sulla base del "Contratto di servizio pubblico" tra Regione e operatore ferroviario; disciplinato dal Regolamento europeo n° 1370/2007,
- per il trasporto a lunga percorrenza le tariffe sono disciplinate in concorrenza tra i vari operatori.

[3] Comitato Interministeriale per il Coordinamento Economico

2.1.2. Documentazione a servizio dell'impresa ferroviaria

Quanto illustrato precedentemente viene poi introdotto in documentazione specifica rivolta sia agli operatori aziendali sia all'utenza. Per il personale si redige l'Orario di Servizio: un documento ufficiale composto da due opere normative: la Prefazione Generale all'Orario di Servizio (PGOS), unica per l'intera rete, e la Prefazione Unità Periferica all'Orario di Servizio (PUPOS), per ciascuna Direzione Territoriale[4]. Inoltre nel Fascicolo Orario vengono forniti i programmi di effettuazione dei treni viaggiatori, le tracce dei treni ordinari e straordinari, gli elementi significativi relativi alle linee interessate dall'esercizio. Per un approfondimento ed un'applicazione della PGOS si rimanda al *paragrafo 2.2*. All'interno dell'azienda vengono inoltre usati gli Orari Grafici costituiti da reticoli cartesiani in cui vengono riportate in ordinate le stazioni, e le rispettive progressive chilometriche, e in ascisse le ore. Verrà dedicato il *paragrafo 2.1.3* per approfondire il tema dell'orario ferroviario. Con la liberalizzazione del mercato e le diverse automazioni introdotte nell'esercizio ferroviario, oggi si asserisce alle "Tracce Orario" che, basandosi sulla potenzialità della linea, vengono messe a disposizione da parte del Gestore dell'Infrastruttura alle Imprese Ferroviarie. I Fascicoli Orario sono progressivamente sostituiti dai Fascicoli di Linea nei quali vengono riportate le caratteristiche della linea in termini di Fiancate Principali e Fiancate di Linea. Essi sono rappresentazioni grafiche riportanti in maniera sintetica ed intuitiva ogni peculiarità d'interesse agli Operatori dell'Esercizio.

Nelle Fiancate di Linea (Figura 20) vengono indicati:

- il grado di frenatura: indicato con numeri romani da I a X, descrive "la pendenza della linea per un senso di marcia in relazione alle esigenze di frenatura di un convoglio" (WikiRAIL, 2019);

Gradi di frenatura	**Ia**		**I**		**II**		**III**		**IV**		**V**		**VI**		**VII**		**VIII**		**IX**	
Pendenza ‰	dal	al	oltre	al	oltre	al	oltre	al	oltre	al	oltre	al	oltre	al	oltre	al	oltre	al	oltre	al
	0	4	4	6	6	8	8	11	11	13	13	16	16	20	20	25	25	30	30	35

Tabella 7 - Gradi di frenatura (Fonte: Prefazione Generale all'Orario di Servizio, RFI, 2016)

- la velocità massima [km/h]: specifica per i diversi ranghi di esercizio [5];

[4] La Rete Nazionale è divisa in Direzioni Territoriali che si occupano soprattutto della manutenzione e degli interventi in caso di guasti ed anomalie nella propria area di competenza. In Italia oggi sono 15 aventi sedi nelle città di Torino, Genova, Milano, Verona, Venezia, Trieste, Bologna, Firenze, Ancona, Roma, Napoli, Bari, Reggi Calabria, Palermo e Cagliari.

[5] Rango di esercizio: categoria di velocità massima raggiungibile su un determinato tratto di linea differente in base alla tipologia di materiale rotabile. Attualmente sono quattro: A, B, C e P.

- la progressiva chilometrica: allegata ad una semplice rappresentazione grafica dell'ubicazione dei manufatti e del costruito rispetto la linea, si definiscono le progressive chilometriche a partire dalla stazione di riferimento per ciascuna linea;
- la località di servizio: Nell'articolo 3.1 della PGOS (RFI, 2016) vengono così suddivise:

MAIUSCOLO	Stazione capotronco
MAIUSCOLO	Stazione capotronco di linea a Dirigenza Unica
MAIUSCOLO	Stazione di diramazione
Minuscolo	Stazioni normalmente rette da dirigente di movimento
Minuscolo	Stazioni di linea a dirigenza unica
Corsivo	Fermate sprovviste di binari di incrocio o precedenza o, sul doppio binario, di collegamento fra i binari di corsa
Corsivo	Fermate nelle quali i deviatori sono immobilizzati

Nel Regolamento Circolazione Treni (articolo 2) vengono fornite ulteriori definizioni, in particolare: si definisce "stazione" una località delimitata da segnali di protezione, utilizzate per regolare la circolazione e munite di impianti atti ad effettuare le precedenze o gli incroci fra treni. Le stazioni di diramazione sono quelle nelle quali convergono due o più linee, le stazioni capotronco sono le stazioni principali alle quali fa riferimento la circolazione della linea competente. Verrà fornita una spiegazione più dettagliata di esse nel *paragrafo 3.2*.

Nelle Fiancate Principali (Figura 20) vengono inserite le informazioni riguardanti:

- il grado di prestazione: definisce la pendenza e la tortuosità della tratta in determinate sezioni, è una misura riferita alle resistenze al moto incontrate dal mezzo (Orlandi, 1990);
- l'ascesa [‰]: in riferimento alla pendenza delle livellette;
- le progressive chilometriche, analoghe alle Fiancate di Linea;
- il numero dei binari e la capacità (o potenzialità) della sezione, intesa come numero di treni che possono transitare nell'unità di tempo stabilito (solitamente 24 ore). Nei seguenti fascicoli la capacità è calcolata con metodo RFI ed è riferita alle singole sezioni.

- Le indicazioni di servizio e protezione dei passaggi a livello (PL), con grafica descritta nella PGOS all'articolo 3. Si riportano solo alcuni estratti dell'articolo con le definizioni principali, rimandando alla lettura di esso per la simbologia più occasionale:

Tratto di linea con blocco elettrico manuale

Tratto di linea con blocco elettrico conta-assi

Tratto di linea con blocco elettrico automatico

Tratto di linea con blocco elettrico automatico a correnti codificate atto a consentire la ripetizione continua in macchina dei segnali e delle condizioni di via

Tratto di linea con blocco elettrico automatico a correnti codificate atto a consentire la ripetizione continua in macchina dei segnali e delle condizioni di via con più di quattro codici

Tratto di linea attrezzato con SCMT.

e per quanto riguarda il segnalamento presente:

Stazioni munite di doppio segnalamento di protezione e partenza.

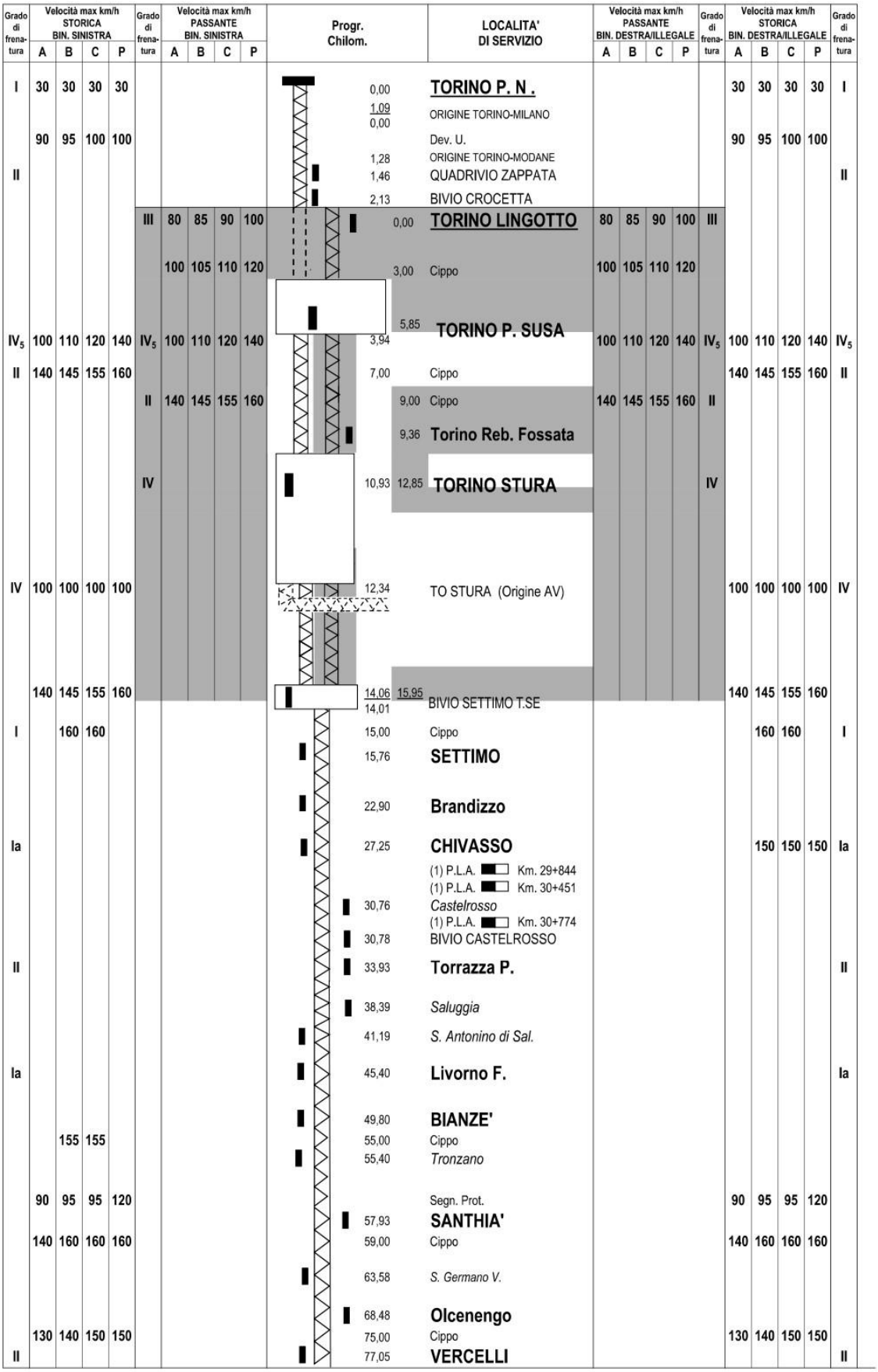
Stazioni munite di doppio segnalamento di protezione e partenza, quando al segnale di partenza è accoppiato un segnale di avviso.

Località munite solo di segnale di protezione di 1ª categoria

Stazioni munite di segnale imperativo di blocco per la circolazione sul binario di destra

Località munite solo di segnalamento di 1ª categoria con accoppiato segnale di avviso

- le distanze parziali tra due località successive;
- le località di servizio, con uguale grafia proposta nelle Fiancate di Linea;
- i posti di blocco;



(1) I P.L.A. sono protetti da segnale proprio di cui all' Art. 53/1a RS solo per il binario di destra

Figura 20 - Fiancata di Linea (Fonte: Fascicolo Linea n°4, RFI, 2012)

Linea **TORINO-NOVARA** (linea Storica)
Trazione elettrica a corrente continua. Esercizio con Dirigente Centrale (sede a Torino)
PER I TRENI PERCORRENTI IL BINARIO DI DESTRA

Grado di prestazione	Ascesa °/oo	Progressive chilometriche	Distanze parziali	LOCALITA' DI SERVIZIO	Posti di blocco	INDICAZIONI DI SERVIZIO E PROTEZIONE P.L.	Numero e capacità binari
7	0	(1)0,000 (1)1,092 0,000	1,092	**TORINO P. NUOVA** ORIGINE TORINO-MILANO Dev.U *(per Torino Lingotto)*	302d	3 (2) (7) (8)	vari
	7	1,276	1,276	ORIGINE TORINO-MODANE			
		1,465	1,465	QUADRIVIO ZAPPATA *(per Torino S.Paolo)*	304d	2 60 (9)	
1	0	2,139	0,674	BIVIO CROCETTA	306d	(9)	
13		3,943	1,804	**TORINO P. SUSA**	906d	2	—
		5,097	1,154		P908d		
	14	6,266	1,169		P910d		
	5	7,000	0,734	Cippo			
		7,620	0,620		P912d		
	0	8,000	0,380	Cippo			
		8,919	0,919		P914d		
1	12	10,935	2,016	**TORINO STURA** *(per P.M. Cigliano)*	916d	2	(650-475)
		12,347	0,347	TO STURA (Origine AV)			
		12,785	0,475		P918d		
		14,171 14,123	1,349	BIVIO SETTIMO T.SE	318d		
		15,000	0,877	Cippo			
1	0	15,763	0,763	**SETTIMO** *(per Rivarolo)*	320d	(a)	(594)
		22,871	7,108	P.L.		Segn. Prot. Brandizzo	
	6	22,896	0,025	**Brandizzo**	326d	(a)	—
		23,225	0,329	RTB		Posto controllo Chivasso	
		24,531	1,306	P.L.A.		Segn. Part. Brandizzo	
		25,491	0,960	P.L.		Segn. Prot. Esterno Chivasso	
		25,508	0,017	P.L.		Segn. Prot. Esterno Chivasso	
		25,700	0,192	P.L.		Segn. Prot. Esterno Chivasso	
	5	27,251	1,551	**CHIVASSO** *(per Asti)*	330d	(3) (4) (5) (6) Segnale di partenza del 2° binario collegato con RTB al km 23,225	(621-539)

(1)Progressive riferite alla linea Torino-Alessandria
(2)Inizio RSC al Km. 0,230
(3)La stazione di Chivasso è munita di due successivi segnali di protezione: il primo, esterno, protegge il fascio Parco, mentre il secondo, interno, protegge soltanto il fascio viaggiatori. L'avviso del secondo è accoppiato al primo..
(4)Fine RSC Km 27,476.
(5) Stazione munita di tabelle limite fermata SCMT. Vedere sez.4.23.
(6) Inizio SSC al segnale di partenza e fine al Dev di uscita
(7) La stazione munita di P.I. posticipato. Vedere Sez. 4.23.
(8) Inizio SCMT al segnale di partenza.
(9) La sede del DPC è ubicata nel fabbricato dell' Ufficio Movimento di Torino P.Nuova.
(a)I segnali di protezione e partenza possono assumere le caratteristiche di permissività secondo le modalità previste dall'art. 48/5 R.S.

Figura 21 . Fiancata Principale (Fonte: Fascicolo Linea n°4, RFI, 2012)

Nell'*allegato A* verranno proposte alcune semplificazioni delle Fiancate di Linea e Fiancate Principali utilizzate nella linea in esercizio al Gruppo Torinese Trasporti: esse riporteranno meno informazioni delle originali e saranno composte dall'unione di più fascicoli in modo da avere una rappresentazione unica e coerente del percorso sui diversi tratti delle linee utilizzati dall'azienda per il servizio offerto SFM1. Essi sono derivanti dai Fascicoli di Linea n°4 di RFI e i Fascicoli di Linea n° 1 e 3 di GTT. Si analizzano ora i principali elementi presenti nel tratto interessato, prendendo in considerazione la divisione tra i due Gestori, in particolare il tratto Rivarolo – Settimo Torinese (GTT) e Settimo Torinese – Chieri (RFI).

Tratto Rivarolo – Settimo Torinese: la linea a semplice binario si sviluppa per 22 km con un'ascesa massima di 12‰ in prossimità della località di Feletto. Il grado di prestazione massimo è di livello 13 tra Bosconero e Rivarolo. Le località di servizio in cui i treni effettuano la fermata sono 6: Rivarolo, Feletto, Bosconero, San Benigno, Volpiano e Settimo Torinese. La linea conta 6 posti di blocco identificabili, per ovvia ragione di circolazione su semplice binario, con le stazioni presenti sulla linea. La tecnologia per il sistema di protezione è di tipo blocco elettrico conta-assi e le stazioni sono munite di doppio segnalamento di protezione e partenza. Il grado di frenatura massimo risulta IV è consentita la circolazione solo dei ranghi A e B. La capacità risulta ridotta, soprattutto influenzata dalla presenza del singolo binario, avendo valore minimo di 164 treni/giorno e un valore massimo di 289 treni/giorno.

Tratto Settimo Torinese – Chieri: la linea a doppio binario attraversa il nodo di Torino, di grande importanza nella rete nazionale. La tratta si sviluppa per circa 35 km effettuando servizio nelle località di Torino Stura, Rebaudengo, Torino Porta Susa, Torino Lingotto, Moncalieri, Trofarello e Chieri. L'ascesa massima risulta minore rispetto la tratta precedente (9‰), con un grado di prestazione variabile tra 1 e 11. La tecnologia adottata per la protezione della marcia dei treni è di tipo blocco elettrico automatico a correnti codificate con stazioni munite di doppio segnalamento di protezione e partenza accoppiato con segnali di avviso. La capacità è notevolmente maggiore, per un massimo di 687 treni/giorno. È ammessa la circolazione dei ranghi A, B, C e P con un grado di frenatura massimo di V. Le velocità ammesse in linea sono di 140 km/h.

2.1.3. L'orario ferroviario

La realizzazione di un orario obbliga l'azienda ad effettuare un servizio. Esso rappresenta un particolare tipo di programma d'esercizio necessario per la circolazione su rotaia, che dipende

dal fatto stesso di essere una circolazione guidata. La necessità dell'orario di servizio, sotto l'aspetto tecnico, è legata alle caratteristiche stesse del sistema ferroviario per cui il movimento dei treni è regolato secondo norme ben definite che ne disciplinano la velocità, la successione, le soste, gli incroci e le precedenze. Sotto l'aspetto commerciale invece la conoscenza dell'orario è richiesta dall'utente che vuole usufruire del servizio. La composizione dell'orario, in funzione delle caratteristiche plano-altimetriche della linea, delle velocità ammesse, degli impianti di sicurezza e del segnalamento, delle lunghezze delle sezioni di distanziamento e dei mezzi di trazione è uno degli aspetti peculiari di chi opera nell'esercizio ferroviario. La stesura dell'orario avviene per fasi successive. In ordine temporale viene prima predisposto l'orario delle relazioni internazionali e dei treni a lunga percorrenza, successivamente avviene la definizione degli orari per servizi a carattere locale. Inoltre l'orario viaggiatori tiene conto anche delle esigenze degli enti pubblici e delle categorie di viaggiatori.

L'orario grafico

Lo studio dell'orario viene condotto, linea per linea, avvalendosi di uno strumento detto "orario grafico" dei treni che consente di aver sott'occhio su un normale grafico cartesiano la situazione dell'orario di linea per le 24 ore della giornata. Trattandosi di un semplice diagramma cartesiano in cui vengono riportati in ascissa i tempi e in ordinata le località di servizio, i treni vengono rappresentati da linee oblique ascendenti (treni pari) e discendenti (treni dispari). Da ciò deriva che le tracce dei treni ascendenti e discendenti su linee a semplice binario possono incrociarsi solo in corrispondenza delle stazioni o posti di movimento atti a ricevere treni, in quanto solo in tali località possono avvenire gli incroci. L'inclinazione del tracciato rappresenta la velocità del treno. Per la chiarezza e l'immediatezza, l'orario grafico è uno strumento valido per monitorare l'impostazione dell'orario e la circolazione dei treni (grafico reale della circolazione dei treni) (Vicuna, 1993). Quest'ultimi non sono più realizzati manualmente dagli operatori in servizio presso le stazioni ma sono affidati a sistemi automatici che elaborano in tempo reale la circolazione effettiva della linea. In Figura 22 viene riportato un esempio, evidenziando alcune particolarità desumibili dalla sua interpretazione. Come si può vedere, treni di diversa categoria o funzione sono rappresentati da colori diversi, al fine di facilitare ulteriormente la chiarezza e l'immediata comprensione. Non si lascia alla sola interpretazione delle tracce l'individuazione dei tratti a singolo e a doppio binario, ma generalmente ci si avvale di simbologia grafica in ordinate. In questo caso la tratta a doppio binario è individuata mediante

una linea più spessa parallela all'asse delle ordinate. Dall'orario inoltre è desumibile l'omotaticità della flotta, in quanto le pendenze sono pressoché uguali per ogni traccia. Si evidenzia infine l'interruzione del servizio tra le 10:45 e le 12:15 nel tratto Rivarolo – Settimo: vedremo nel *paragrafo 2.2.2* la necessità di pianificare degli spazi idonei di interruzione di binario riservati alla manutenzione della linea denominati Interruzione Programmata di Orario (IPO) (Regolamento Circolazione Treni - articolo 18, 19 e 20). L'impostazione dell'orario di un treno, in relazione alla funzione che esso deve svolgere, comporta la scelta delle ore di partenza e di arrivo ai capolinea nonché lo studio dell'orario vero e proprio, ovvero della velocità di esercizio nei diversi tratti della linea. Spesso si richiede una più precisa scelta di orario per i treni di carattere locale, come verrà illustrato nell'esemplificazione della Linea Canavesana, che non per i treni a lunga percorrenza, anche se più importanti. In Figura 22 viene cerchiato in rosso un incrocio in linea (tratto a doppio binario), cerchiato in azzurro incrocio in stazione (tratto a singolo binario). Cerchiato in giallo il riferimento grafico usato per identificare la tratta a doppio binario. Cerchiata in viola la finestra manutentiva pianificata, con indicazione di tracce arancioni – vedi per i treni straordinari (ovvero i carrelli per manutenzione)

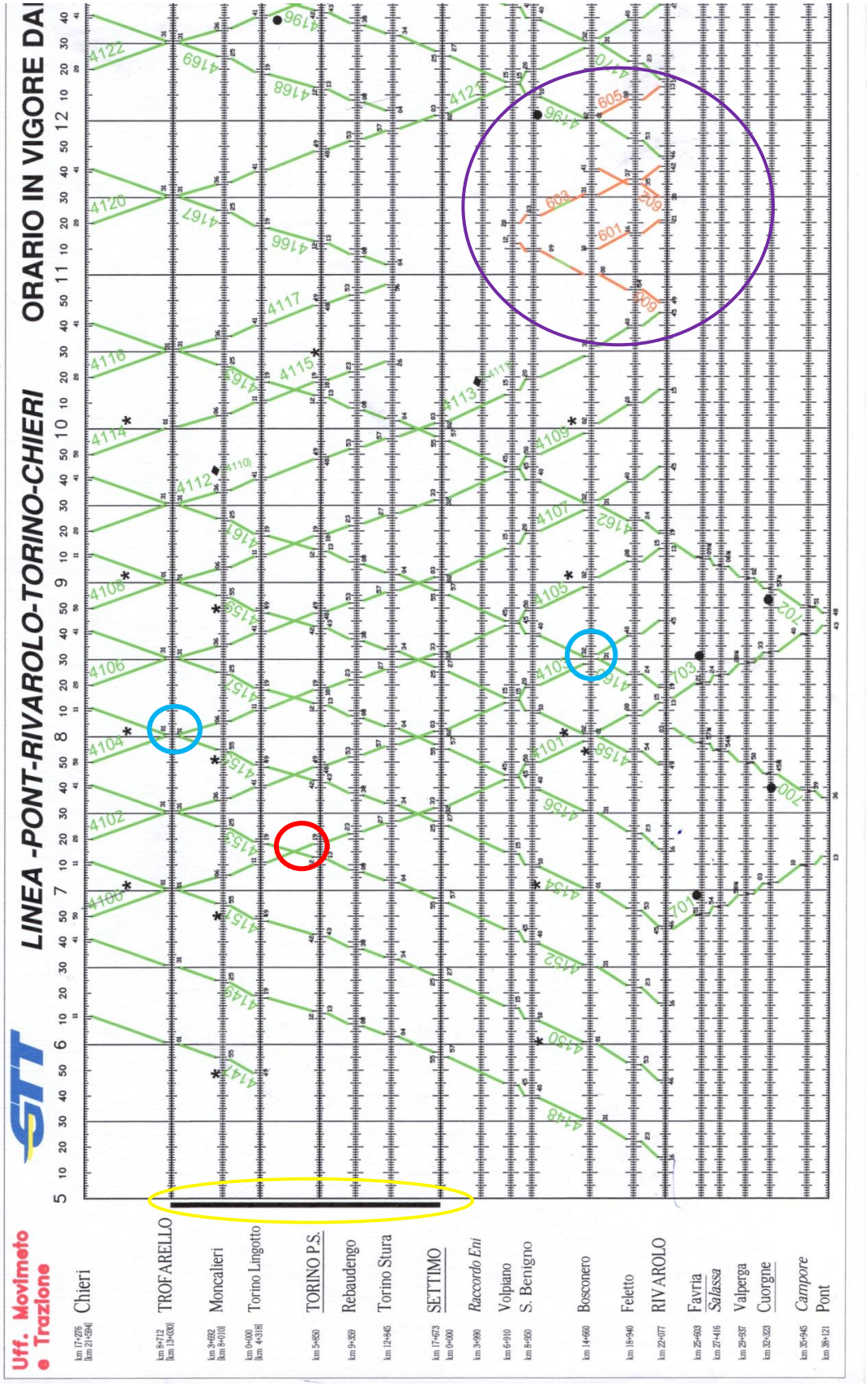


Figura 22 – Estratto dell'orario grafico Linea Pont – Rivarolo – Chieri. (Fonte: Gruppo Torinese Trasporti)

L'orario stabilisce per ogni treno la relativa categoria di velocità, il peso, le fermate e la loro durata. Lo studio dell'orario di un treno consiste quindi nel determinare, dato il tipo di locomotiva e le caratteristiche della linea, il peso trainato e la velocità di piena corsa che si deve realizzare. La compilazione dell'orario di un treno bloccato, ovvero un treno a composizione fissata, porta la necessità di modificare la velocità in relazione ad ogni variazione plano-altimetrica della linea (ovvero al grado di prestazione – *paragrafo 2.1.2*). Per ragioni di praticità al materiale rotabile viaggiante vengono assegnati a prestabilite categorie di velocità che corrispondono alle velocità in piena corsa che i treni, impostati in quella determinata categoria, devono mantenere sui tratti di linea pianeggiante e ad andamento favorevole (grado di prestazione pari ad 1). Man mano che aumenta il grado di prestazione, la velocità di corsa corrispondente a ciascuna categoria viene ridotta, in relazione alla caratteristica meccanica di locomozione. Con tale sistema il treno, pur variando la velocità effettiva, mantiene inalterata la categoria in cui è impostato. In tal modo, attraverso le relazione esposte nel *paragrafo 1.1.1*, per ogni sezione di linea a resistenza di trazione costante, e cioè a grado di prestazione costante, si determina la velocità caratteristica corrispondente alla categoria base. Tali informazioni sono facilmente reperibili nella PGOS, ad uso immediato dell'operatore di esercizio. Stabilita la categoria di velocità in cui deve essere impostato un determinato treno e la locomotiva da impiegare, resta da determinare la massa trainabile e i tempi di percorrenza fra stazione e stazione, che costituiscono gli elementi principali per la compilazione dell'orario di servizio di una linea. Per quanto la massa del treno, e quindi la sua composizione, vengono predisposte Tabelle di Prestazione nella PGOS (Tabella 8).

Massima massa rimorchiata ammessa dalla resistenza degli organi di attacco - Treni di materiale ordinario trainato da locomotive e senza locomotive attive in coda

GRADI DI PRESTAZIONE															
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
MASSIMA MASSA RIMORCHIABILE IN DECATONNELLATE															
250	250	250	250	244	235	224	214	203	194	183	173	166	158	152	145

GRADI DI PRESTAZIONE														
17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
MASSIMA MASSA RIMORCHIABILE IN DECATONNELLATE														
137	130	123	118	114	111	104	101	95	90	87	83	80	74	69

Tabella 8 - Tabella di prestazione (Fonte: PGOS, 2016)

I corrispondenti tempi di percorso sono oggi calcolati attraverso elaborazione informatica, e sono state soppresse dalla PGOS le relative Tabelle di percorrenza. In esse si trovavano indicazioni riguardo:

a) la velocità massima della linea nei singoli tratti,
b) la successione delle stazioni con relativa distanza fra esse,
c) i gradi di prestazione e i gradi di frenatura,
d) le velocità medie
e) i tempi di percorrenza in minuti, o frazioni di minuto,
f) l'indicazione dei perditempo per avviamento e arresto nelle stazioni intermedie.

Il metodo delle categorie di velocità e dei gradi di prestazione presenta un'indiscutibile elasticità e praticità e permette una buona utilizzazione delle prestazioni offerte, ma è influenzato dal carattere forfettario. Perciò il metodo, con l'aumento delle masse e delle velocità, non ha più soddisfatto le esigenze dovendo ricorrere al tracciamento dell'orario per mezzo di software informatici.

La qualità dell'orario ferroviario

L'orario riveste un ruolo fondamentale nella scelta modale: determinando l'accessibilità spaziale, temporale e la velocità, ovvero le prestazioni del treno per ciascuna coppia origine – destinazione (O/D), esso incide sul fattore tempo che in genere, insieme al prezzo, risulta il principale parametro per effettuare la scelta modale. L'attrattività del trasporto ferroviario quindi è data anche dalla qualità dell'orario: un servizio può avere successo se è stato stilato un buon orario che attragga il maggior numero di viaggiatori. È dunque importante che nella definizione di un piano di trasporti da parte dell'azienda sia posta attenzione alla qualità dell'orario: che siano considerati, oltre agli aspetti delle frequenze di passaggio e dell'architettura, anche gli aspetti strutturali dell'orario; che siano individuate le possibili alternative progettuali comprendendo in ognuna di esse vantaggi e svantaggi che ricadono sulla domanda (Ciuffini, 2011). Tendenzialmente, quando si parla di qualità dell'orario ferroviario, si fa riferimento alla sua stabilità. Qui il concetto si amplia, comprendendo la qualità in termini di prestazioni temporali garantite dal servizio e quindi di attrattività di viaggiatori: un servizio è di qualità se riesce a fornire prestazioni competitive rispetto le altre modalità. Gli effetti di un orario in termini di prestazioni variano a seconda delle relazioni O/D considerate: ciò che conviene ad alcuni viaggiatori può non andar bene ad altri. Ad esempio la soppressione di una fermata volge a favore di alcuni viaggiatori, poiché i tempi di percorrenza si riducono, ma penalizza altri viaggiatori appartenenti ad una coppia O/D differente. Per valutare la qualità di un orario è quindi necessario:

- Tenere conto delle diverse relazioni O/D, considerando che il miglioramento di alcune prestazioni su determinate relazioni possono peggiorarne altre;
- Valutare la domanda potenziale sulle diverse relazioni O/D, per capirne il peso;
- Valutare le prestazioni in relazione alle modalità concorrenti.

Qualora l'obiettivo dell'azienda sia massimizzare la scelta modale su ferro, la qualità dell'orario viene intesa come una qualità di natura trasportistica, da misurare in termini di uso collettivo del fattore tempo (Ciuffini, 2011). Un orario può essere di due tipi: cadenzato, come nel caso della Ferrovia Canavesana nella quale i servizi si ripetono a cadenze regolari, oppure di tipo tradizionale, con le corse l'una diversa dall'altra ed un'offerta irregolare e discontinua. Se un orario è di tipo cadenzato, esso è definibile a livello di sistema attraverso una "griglia di tracce" che si ripete regolarmente nel tempo. Definire l'orario significa quindi:

- individuare i prodotti standard,
- definire la loro frequenza,
- progettare la loro combinazione reciproca, cioè la loro struttura.

Individuare i singoli prodotti significa definire i capolinea, il percorso (qualora sia possibile più di un itinerario) e le fermate intermedie. Il singolo prodotto si ripete nel tempo sempre con le medesime caratteristiche. La frequenza invece definisce con quale intervallo temporale, definito "cadenza", avviene la ripetizione. I singoli prodotti possono poi combinarsi tra loro in maniera diversa: possono essere definite più strutture a parità di prodotti e frequenze. Ma anch'essa, una volta stabilita, si ripete in modo regolare nel tempo. Se ad esempio in un determinato nodo è prevista una coincidenza tra due prodotti, questa sarà sistematica e si ripeterà ogni volta con la stessa sequenza e lo stesso tempi di attesa.

L'orario cadenzato integrato (OCI)

Un ulteriore elemento di novità nella progettazione dell'orario, oltre al cadenzamento già esposto, è la sua integrazione con le altre linee e gli altri servizi. Esso è basato su due definizioni: la prima è la regolarità. Il servizio offre al cliente partenze ad intervalli regolari, sempre allo stesso minuto. Di regola il lasso di tempo fra due corse è di 1 ora (60 minuti) oppure sottomultipli di essa, cioè 30 o 15 minuti. Cadenze corte sono tipiche dei servizi urbani e regionali, ad esempio la Ferrovia Canavesana ha un cadenzamento di 30 minuti nei giorni feriali, 60 minuti il sabato e 120 minuti la domenica, in rapporto con la scarsa domanda nel fine settimana. La seconda definizione necessario per l'OCI è la simmetria. Le tracce di

circolazione sono simmetriche fra loro rispetto ad un punto temporale preciso e costante per tutto il sistema. Concretamente il minuto di partenza di un servizio da A verso B è l'immagine speculare del minuto di arrivo dello stesso servizio da B verso A. più semplicemente si può vedere come, in una direttrice, la somma del minuto di partenza e del minuto di arrivo in una stazione è sempre 60. Come conseguenza di ciò i treni si incrociano nell'ora piena (minuto 00). Se la frequenza di circolazione è oraria un secondo incrocio avviene al minuto 30. Gli incroci di treni quindi avvengono ad intervalli temporali pari alla metà del cadenzamento del servizio (Pellandini, 2003). Si analizzi ad esempio l'orario grafico del sabato della Ferrovia Canavesana nell'intorno della stazione di Settimo Torinese (Figura 23), già descritta come uno dei nodi più importanti per la linea e punto di scambio con eventuali altre linee. Il cadenzamento nel periodo pomeridiano è di 60 minuti. Come si vede in Figura 23 i treni in arrivo da Chieri (treni 4072, 4074 e 4132) giungono a Settimo al minuto 03 mentre i treni in partenza da Settimo per Chieri (treni 4093, 4177 e 4181) iniziano il loro tragitto al minuto 57. Inoltre i treni si incontrano nell'ora piena poco più a sud di Settimo Torinese (ad esempio il treno 4177 incrocia il treno 4072 alle ore 16:00) e presso la stazione di Trofarello al minuto 30 (ad esempio i treni 4177 e 4074 si incrociano alle 16:30). Si parla in questo caso di "percorrenze di sistema" fra due stazioni. [6]

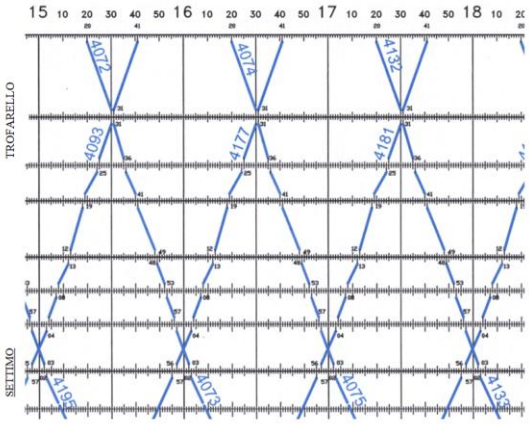


Figura 23 - Dettaglio orario grafico Linea Pont - Rivarolo - Chieri, giornata di sabato. (Fonte: Gruppo Torinese Trasporti)

Questa regola temporale suggerisce una rilevante conseguenza spaziale: se la traccia di circolazione dei treni è progettata in modo che essi ai minuti 00, 15, 30 e 45 si trovino in una stazione in cui confluiscono più linee, si crea la condizione ideale per creare un'integrazione

[6] Da notare l'impossibilità di denominazione "treno pari" e "treno dispari" in quanto i treni variano la loro numerazione lungo il percorso, pur restando fisicamente gli stessi. In particolare la variazione avviene con il cambio di gestione dell'infrastruttura in quanto le due società (RFI e GTT) non adottano la stessa convenzione.

tra di esse. La stazione assume quindi il ruolo di “stazione interscambio” (o “stazione nodo”). Proprio per la proprietà dell’orario di far congiungere in essa treni contemporaneamente. La regola della simmetria è quindi il cardine della costruzione dell’integrazione sistematica. Queste regole permetterebbero di creare un’unica rete anche in presenza di operatori di esercizio differenti. Il sistema ferroviario, ed il suo orario, sono definiti a favore dell’utenza e i vari elementi sono appaltati ad operatori diversi che gestiscono tuttavia un sistema coordinato integrato. È difficilmente pensabile il contrario, ovvero che da differenti linee gestite autonomamente e con imprese ferroviarie non dialoganti tra loro, si riesca ad offrire un servizio di questo tipo. Un ulteriore passaggio può essere progettare l’infrastruttura nascente al fine di creare un’integrazione intrinseca nella rete. Si è già notato che i punti di interscambio devono trovarsi ad una distanza temporale pari alla metà del tempo di cadenzamento. Anziché impostare l’esercizio secondo il principio di “veloce quanto necessario” per ottenere tale integrazione, si pianifica a priori l’investimento infrastrutturale sincronizzato con la necessità tecnica del sistema e impostando l’esercizio alla “velocità massima possibile”. L’OCI quindi ribalta il processo pianificatore: partendo dal disegno dell’orario (e quindi dell’offerta) con le integrazioni volute e le capacità richieste, si può pianificare esattamente l’infrastruttura occorrente. In termini schematici:

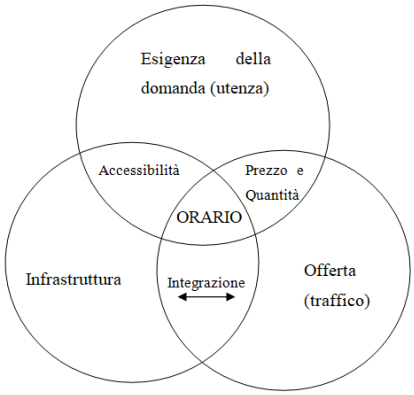


Figura 24 - Integrazione fra infrastruttura, esercizio e domanda: l'orario cadenzato integrato

L’OCI rappresenta quindi il punto in comune tra i tre attori del sistema di trasporto ferroviario: il cliente con le sue esigenze (la domanda), l’infrastruttura e l’operatore di esercizio (l’offerta). Graficamente l’OCI è rappresentato da un reticolo in cui ogni tratto rappresenta un tipo di treno che circola regolarmente sulla linea e in corrispondenza delle stazioni si indicano i minuti di partenza e arrivo di questo treno. La coordinazione è rappresentata in maniera intuitiva da un orologio in cui vengono mostrate tutte le combinazioni di connessione (Figura 25):

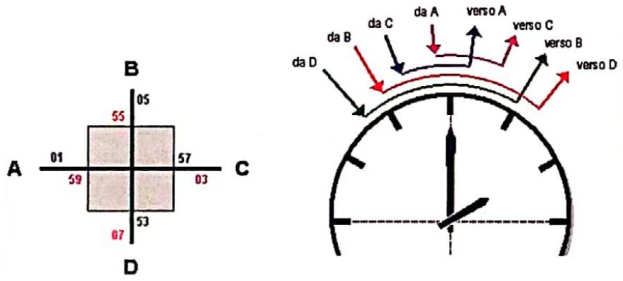


Figura 25 - Reticolo dell'OCI (Fonte: Pellandini, 2003)

L'OCI risulta di particolare vantaggio anche per chi progetta l'esercizio ferroviario in quanto ha conseguenze rilevanti sull'utilizzo del materiale rotabile. Tendenzialmente un servizio integrato termina la propria corsa in una stazione d'interscambio: il materiale giunge alla stazione alcuni minuti prima dell'ora o mezz'ora. Perciò nella maggioranza dei casi è disponibile un lasso di tempo di 10 o 20 minuti per eseguire il "girobanco", ovvero per preparare la composizione per il senso inverso. Questo tempo è sufficiente e ideale in quanto minimizza i tempi improduttivi. Si dispone quindi di uno strumento che facilita il calcolo del fabbisogno di materiale rotabile e i turni, gestiti dai Direttori di esercizio ferroviario delle singole imprese. (Pellandini, 2003)

Dall'Orario grafico al numero di treni: la Ferrovia Canavesana

Nella quotidiana gestione dell'esercizio di un'impresa ferroviaria, una volta stipulato l'orario grafico, esso risulta un valido strumento al fine di stabilire il numero di treni necessari. La gestione della Linea Canavesana prevede la partenza di un treno la mattina da Torino Lingotto e i restanti in partenza da Rivarolo. Tale dato è di primaria importanza in quanto, nella progettazione del numero di treni necessari, bisogna tener conto del luogo dove a fine giornata devono rientrare. Un altro elemento importante per questa linea è il servizio a navetta: i treni compiono per l'intera giornata un servizio andata–ritorno da Rivarolo a Chieri, senza essere impiegati in altre linee. Operativamente si definisce il tempo necessario ad un treno per compiere una sola andata, semplicemente sommando i tempi di percorrenza e il tempo di sosta nelle fermate intermedie. Esso assume un valore pressoché costante nella giornata di 85 minuti. Si calcola inoltre il tempo necessario all'inversione del treno nella stazione capolinea: la versatilità dei TTR adottati, e la facilità di utilizzo, permette ai Macchinisti esperti di impiegare l'inversione in poco più di 5 minuti. Nell'esercizio della Ferrovia Canavesana si fissa il giro banco da 9 a 39 minuti presso la stazione di Chieri e da 6 a 33 minuti presso la stazione di Rivarolo. Tali tempi sono supportati dalla disponibilità, dalla turnazione e dalla

competenza del personale di macchina. Si ripete il processo di sommatoria dei tempi per il ritorno e il treno risulta nuovamente disponibile per un nuovo ciclo. La direzione dell'esercizio deve sempre assicurarsi di avere treni disponibili alla partenza, perciò il calcolo anche se di natura grafica e molto semplice, risulta di primaria importanza e necessita di attenzione e meticolosità. Il rispetto dei tempi è funzione della circolazione, è possibile prevedere treni aggiuntivi in caso di anomalie ma bisogna prestare attenzione sia all'organizzazione della linea, specialmente nel tratto a semplice binario, sia al giro macchine. A causa della frequente indisponibilità del materiale rotabile, principalmente fermo in manutenzione, la non regolarità dell'esercizio porta alla soppressione della coppia di corse che il treno avrebbe dovuto eseguire nel successivo ciclo, con evidente disagio per l'utenza e perdita per l'azienda sia in termini economici sia di qualità del servizio erogato. Ad oggi la gestione di tali eventi eccezionali non è frutto di calcoli bensì di un'assodata esperienza, che permette alla direzione dell'esercizio di sopperire al meglio alle necessità in tempi rapidi. Nell'*allegato B* vengono riportati i diagrammi utilizzati per il calcolo, essi sono comprovati dalla teoria della Tecnica dei Trasporti ed in particolare dalla definizione del "tempo ciclo", che si illustrerà successivamente in questo paragrafo. Graficamente dall'Orario Grafico si ricava la necessità di formare 7 treni operanti da lunedì mattina a sabato mattina, 4 treni sabato pomeriggio e 2 treni la domenica. Si intuisce che, dato l'orario e il numero di treni, essi effettueranno chilometraggi diversi durante la settimana (Tabella 9), accumulando anche diverse ore di servizio. Questo aspetto è uno dei collegamenti necessari tra la Gestione dell'Esercizio e la manutenzione programmata, come verrà esposto nel *capitolo 5* e *6*. Avendo i dati delle progressive chilometriche, dalle Fiancate di Linea si ottengono i seguenti risultati:

Feriali	da Lunedì a Venerdì												
	Viaggio 1	**Viaggio 2**	**Viaggio 3**	**Viaggio 4**	**Viaggio 5**	**Viaggio 6**	**Viaggio 7**	**Viaggio 8**	**Viaggio 9**	**Viaggio 10**		**Totale**	
Treno 1	17,276	57,026	57,026	30,121	30,121	57,026	57,026	57,026	57,026	17,276		436,950	km
Treno 2	57,026	57,026	57,026	57,026	57,026	57,026	57,026	57,026	-	-		456,208	km
Treno 3	57,026	57,026	57,026	57,026	-	-	-	-	-	-		228,104	km
Treno 4	57,026	57,026	39,750	39,750	39,750	39,750	57,026	57,026	-	-		387,104	km
Treno 5	57,026	57,026	57,026	57,026	-	-	-	-	-	-		228,104	km
Treno 6	57,026	57,026	57,026	57,026	-	-	-	-	-	-		228,104	km
Treno 7	57,026	30,121	30,121	57,026	57,026	57,026	57,026	57,026	-	-		402,398	km

Feriali	Sabato												
	Viaggio 1	**Viaggio 2**	**Viaggio 3**	**Viaggio 4**	**Viaggio 5**	**Viaggio 6**	**Viaggio 7**	**Viaggio 8**	**Viaggio 9**	**Viaggio 10**		**Totale**	
Treno 1	17,276	57,026	57,026	30,121	30,121	57,026	57,026	57,026	57,026	17,276		436,950	km
Treno 2	57,026	57,026	57,026	57,026	57,026	57,026	57,026	57,026	-	-		456,208	km
Treno 3	57,026	57,026	57,026	57,026	57,026	57,026	-	-	-	-		342,156	km
Treno 4	57,026	57,026	-	-	-	-	-	-	-	-		114,052	km
Treno 5	57,026	57,026	-	-	-	-	-	-	-	-		114,052	km
Treno 6	57,026	57,026	-	-	-	-	-	-	-	-		114,052	km
Treno 7	57,026	30,121	30,121	57,026	57,026	57,026	57,026	57,026	-	-		402,398	km

Festivo	Domenica												
	Viaggio 1	**Viaggio 2**	**Viaggio 3**	**Viaggio 4**	**Viaggio 5**	**Viaggio 6**	**Viaggio 7**	**Viaggio 8**				**Totale**	
Treno 1	57,026	57,026	57,026	57,026	57,026	57,026	57,026	57,026				456,208	km
Treno 2	57,026	57,026	57,026	57,026	57,026	57,026	-	-				342,156	km

Tabella 9 - Computo chilometraggio per ciascun treno

Avendo a disposizione questi dati, è possibile studiare un giro macchine utile per coniugare le esigenze dell'esercizio e le esigenze della manutenzione. Ogni Impresa Ferroviaria è tenuta a stipulare il giro macchine e comprovare il rispetto dei limiti manutentivi, supervisionati da ANSF.

Il tempo ciclo

Si riporta ora una delle nozioni principali della Tecnica dei Trasporti che gli operatori di esercizio sono tenuti a conoscere. Come esposto precedentemente si tende ad operare in maniera grafica per mezzo dell'orario grafico sia per l'intuibilità dello strumento sia per la sua versatilità in caso di cambiamenti nell'esercizio, tuttavia tali nozioni possono essere d'aiuto sia come calcoli preliminari sia come verifica a fine progettazione.

In termini analitici, si fa riferimento a linee nei confronti delle quali per ogni periodo della giornata è valida la seguente relazione:

$$n = \frac{T_c}{i} \quad (2.1)$$

dove:

- T_c: è il tempo ciclo, pari alla somma dei tempi di percorrenza di andata e ritorno comprensivi dei tempi di sosta nelle fermate intermedie e i tempi di sosta ai capolinea. Esso può essere definito intuitivamente come il tempo necessario perché a regime un veicolo della linea transiti nuovamente in un determinato punto della linea stessa,
- n: numero di veicolo impiegati sulla linea,
- i: l'intervallo tra due corse successive.

Per la Linea Canavesana, nel momento di maggiore traffico, il tempo ciclo assume valore di 206 minuti:

$$Tc = tempo\ Rivarolo \rightarrow Chieri + capolinea\ Chieri + tempo\ Chieri$$
$$\rightarrow Rivarolo + capolinea\ Rivarolo = 85 + 30 + 85 + 6 = 206\ minuti$$

Il cadenzamento è impostato a 30 minuti, da cui deriva:

$$n = \frac{T_c}{i} = \frac{206\ minuti}{30\ minuti} = 6{,}86 \rightarrow 7\ treni$$

Risultato analogo al procedimento grafico eseguito a partire dall'Orario Grafico (*allegato B*).

2.1.4. Definizioni ed esigenze di velocità

Un elemento importante nella definizione di un programma di esercizio è la consapevolezza del tempo impiegato per coprire una determinata tratta. Esso prende il nome di "percorrenza" e tiene conto dello spazio fisico che separa due località e delle fermate intermedie previste nell'orario. Il calcolo della percorrenza non risulta di immediata semplicità ma si avvale di elementi tecnici ed organizzativi sia del materiale rotabile sia della linea (*paragrafo 2.2* e *capitolo 3*). Oggi ci si avvale di strumenti di elaborazione informatica ed il calcolo manuale risulta ormai abbandonato. Uno cardini di questa operazione è il concetto di velocità, nelle sue diverse definizioni. Identifichiamo con "velocità reale" quella che il treno raggiunge durante la sua corsa in linea, essa è regolata dal macchinista seguendo i limiti imposti dalla normativa e i limiti tecnici del materiale rotabile, considerando anche le prescrizioni riportate nelle Fiancate di Linea. Tale velocità ricopre un ruolo fondamentale nelle moderne tecnologie a disposizione: il tachigrafo registra costantemente l'andatura del mezzo, perciò l'operato del macchinista, e il rispetto dei limiti imposti. Definiamo inoltre la "velocità commerciale", calcolata sul tempo totale dividendo la distanza percorsa per il tempo che deve impiegare per percorrerla da programma. La "velocità media" nella quale vengono invece esclusi i tempi alle fermate intermedie. La "velocità d'orario" coincidente con la velocità media ma tenendo in conto anche delle soste alle stazioni. Nell'esercizio di cerca di ottenere la massima prestazione dall'organizzazione della linea così da aumentare le velocità sopra citate, nel rispetto della sicurezza. Negli ultimi anni grazie alla tecnologia a disposizione tale obiettivo è sempre più perseguito, portando esiti positivi sulla circolazione. I treni viaggiatori si classificano in base alla loro tipologia: velocità massima e commerciale, fermate intermedie, veicolo utilizzato, composizione, ecc.) e tutto questo si unisce per definire il servizio offerto dall'azienda. (Franceschini et al. , 2019)

Generalmente il tracciato Nazionale non si presta a servizi di tipo metropolitano che invece sono caratterizzati da tracciati più brevi, servizi a maggiore frequenza ed hanno l'esigenza di materiale idoneo alle esigenze del moto che devono compiere (continue fasi di accelerazione, regime, coasting e frenatura). Le Amministrazioni locali hanno chiesto la collaborazione delle

Ferrovie per affrontare la domanda di traffico crescente senza avere una grossa spesa in bilancio per la costruzione di sistemi metropolitani. Tale richiesta fino a pochi anni fa non fu accolta dal sistema ferroviario. Recentemente la situazione si è invertita, grazie all'utilizzo di materiale idoneo e più veloce sia per l'aumento di capacità della linea e dei nodi principali. Da parte delle azienda nazionali si è cercato di concentrarsi sulla circolazione nella Rete Principale, affidando ad Enti Amministrativi come le Regioni il traffico sulla Rete secondaria e stipulando dei contratti di "obblighi di servizio pubblico" con le azienda locali. Qui si inserisce il servizio offerto da GTT nella Ferrovia Canavesana che analizzeremo nei prossimi capitoli.

2.1.5. Organizzazione della linea

Le linee si classificano a seconda del numero di binari disponibili. Le linee a semplice binario sono quelle in cui i treni viaggiano nelle due direzioni sul medesimo binario e si incrociano nelle stazioni o nei Posti di Movimento. Le linee a semplice binario sono attualmente il 53% della rete (9060 km su 16781 km totali), in genere fanno parte delle linee complementari[7]. Graficamente la tratta a semplice binario è raffigurato da una linea continua che coincide con l'asse del binario. Come è già stato esposto precedentemente, tramite un orario grafico è facilmente individuabile la linea a semplice binario in quanto gli incroci avvengono in punti precisi e ripetuti nel tempo (Figura 26), questo comporta sicuramente un aggravio di potenzialità e una difficoltà di esercizio in quanto un treno è vincolato ad un altro per il passaggio, facendo ripercuotere eventuali anomalie sull'intero servizio.

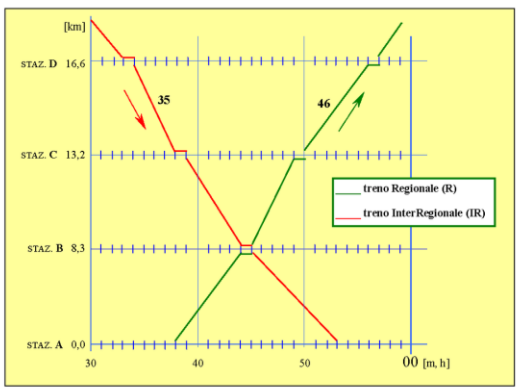


Figura 26 - Orario grafico di una linea a semplice binario
(Fonte: https://it.wikipedia.org/wiki/Gestione_del_traffico_ferroviario)

[7] Linee minori rispetto le linee fondamentali che collegano quest'ultima a località di minore traffico. In totale le linee complementari comprendono 9360 km.

Le linee a doppio binario invece permettono la circolazione in entrambi i sensi di due treni insieme, poiché ciascun binario è specializzato per una direzione di marcia. L'interasse tra le coppie di binari, che generalmente corrono affiancati, sono di 3,55 m in linea (con V_{max} = 200 km/h) e di 4,20 m nelle linee ad Alta Velocità. Il binario specializzato per la circolazione è quello di sinistra, denominato "binario legale". Quando uno dei due binari non è disponibile per la circolazione, è possibile continuare il servizio in entrambi i sensi di marcia utilizzando il binario ancora attivo, in presenza di particolari attrezzature tecniche e segnalamento apposita, parlando di "banalizzazione" del binario (Regolamento Circolazione Treni, articolo 2). Si analizzeranno le disposizioni adottate in caso di binario banalizzato nel *paragrafo 3.1*. La possibilità di banalizzazione permette anche il sorpasso in linea, consentito raramente e sottoposto a normativa ANSF molto severa in termini di sicurezza (*paragrafo 3.3*), consentendo comunque di non fermare il treno più lento. Le linee a doppio binario appartengono maggiormente alla rete fondamentale e ricoprono 7721 km. Vi sono inoltre linee a triplo binario, dove la banalizzazione avviene solo per il binario intermedio, e linee a quadruplo binario (o linee affiancate) in cui la circolazione avviene come se fossero due linee a doppio binario, lasciando alla direzione centrale dell'esercizio la decisione di quale binario usare per far transitare il treno (Figura 27).

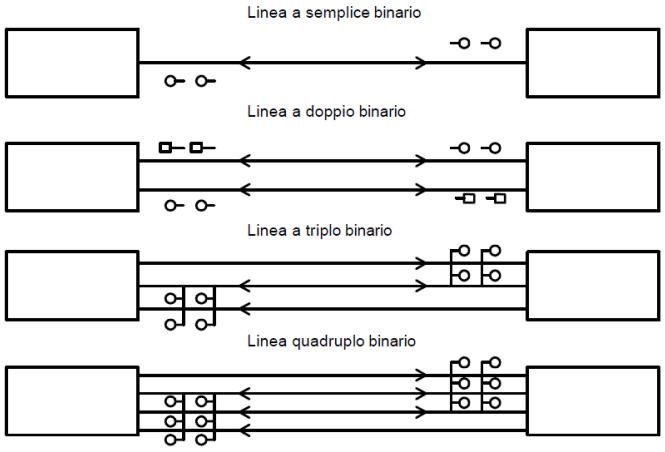


Figura 27 - Schematizzazione circolazione sui binari

Per organizzare la circolazione occorrono dei punti di riferimento lungo le linee, denominati posti operativi a terra. I più importanti coincidono con le stazioni, ma ne sono presenti anche altri:

- i posti di blocco intermedi: l'elemento base per la circolazione è la divisione della linea in sezioni. Grazie ad un sistema di divisione in sezioni lungo la linea è possibile la circolazione di più treni tra due stazioni, incrementando la potenzialità della linea. Nel *paragrafo 2.4* verrà descritto il distanziamento secondo posti di blocco.
- i bivi di linea: con l'avvento di velocità sempre più elevate, i bivi di linea hanno costituito un pericolo per l'instradamento sia per il distanziamento dei treni. Progressivamente sono stati inseriti nelle stazioni limitrofe,dove le velocità sono minori, ma permangono ancora in certi punti della linea e sono telecomandati a distanza.
- i passaggi a livello (PL): sono punti di particolare problema per l'organizzazione dell'esercizio e la sicurezza del sistema. Per definizione si individuano i passaggi a livello come quei punti di intersezione a raso con altre infrastrutture viarie. Occorre perciò che i rispettivi flussi di traffico siano protetti. L'ANSF spinge oggi per la soppressione di essi. A partire dagli anni '80 vennero introdotti passaggi a livello automatici con barriere complete, protette da segnali luminosi ed acustici, che minimizzassero l'indisciplina da parte dell'utenza stradale e pedonale. Le Ferrovie, anche se consapevoli che le eventuali circostanze di pericolo sono dovute ad un mancato rispetto del Codice della Strada da parte di terzi, stanno installando dispositivi, detti PAI-PL (Protezione Automatica Integrata Passaggi a Livello) che, mediante tecnologie avanzate come microonde o radar, possono rilevare la presenza di ingombri nell'area. Tali sistema, collegati al sistema di segnalamento della linea, garantiscono livelli di sicurezza più elevati tuttavia, per l'elevato costo e il numero ingente di PL nella rete, sono utilizzati solo in punti strategici ed a elevato rischio.

2.2. La normativa d'esercizio

Un sistema di trasporto è caratterizzato da vie, veicoli, organizzazione ed impianti atti a soddisfare la domanda di traffico. In particolare, nel sistema ferroviario, la componente "organizzazione" riveste un ruolo preponderante: in essa si intende la regolarità, la programmazione dell'offerta la capacità dell'infrastruttura, la turnificazione del materiale e dei mezzi, la sicurezza dell'esercizio. I regolamenti ferroviari in materia di esercizio si distinguono in regolamenti "alti" (Regolamento Circolazione Treni (RCT) e Regolamento Segnali (RS), di emanazione ministeriale, e Prefazione Generale all'Orario di Servizio (PGOS), (redatto da RFI) e le disposizioni applicative su singoli temi di dettaglio (Istruzioni per il Personale di Condotta delle Locomotive (IPCL), Istruzioni per il Servizio ai Deviatori (ISD), ecc.). In ogni caso tutte le normative possiedono un corpo centrale di descrizione di tutte le operazioni in caso di regolare esercizio ed apparati perfettamente funzionanti ed un'altra parte con la descrizione di un sistema non perfettamente funzionante. La regolamentazione dell'esercizio ferroviario, come la tecnologia adottata, è in continuo cambiamento. Rimangono saldi i principi generali mentre i casi specifici sono frutto di continue evoluzioni da parte di tecnici ministeriali e delle principali azienda che operano nel Paese. La regolamentazione tuttavia deve essere considerata come un complesso di norme che si completano vicendevolmente e non come un insieme di fascicoli separati: a tal proposito si alterneranno nei successivi capitoli aspetti tecnici ad aspetti normativi, cercando di creare un testo completo e pratico dell'esercizio ferroviario. A tal proposito nel *paragrafo 2.1.2* e *2.1.4* sono già stati esposti alcuni documenti e nozioni preliminari per avere gli strumenti per iniziare ad analizzare la PGOS. In questo paragrafo si andrà ad studiare in merito tale documento: esso sarà suddiviso in una prima parte (*paragrafo 2.2.1*) nella descrizione della PGOS, nel *paragrafo 2.2.2* verranno analizzati gli aspetti principali del RCT e si lascerà al *capitolo 3* la descrizione dei contenuti del RS. Si rimanda inoltre al *paragrafo 2.4* per un'applicazione della PGOS sulla linea Rivarolo - Chieri, avendo acquisito nel frattempo ulteriori elementi necessari.

2.2.1. Prefazione Generale all'Orario di Servizio

La Prefazione Generale all'Orario di Servizio è uno dei documenti più importanti per la direzione dell'esercizio in una azienda ferroviaria. Esso, avendo acquisito la conoscenza della linea e degli aspetti tecnici adottati dal Gestore dell'Infrastruttura, può agevolmente calcolare e prendere delle decisioni riguardanti la composizione e la numerazione del materiale rotabile.

Grazie a tale documento si può anche definire la velocità di esercizio da adottare in linea, salvo limitazione imposte dall'Agenzia Nazionale per la Sicurezza Ferroviaria (ANSF) (*paragafo 3.3*). Grazie ad essa, inoltre, l'impresa ferroviaria ha dati sufficienti per stabilire la prestazione necessaria delle locomotive, i limiti di carico e di frenatura, i rapporti di importanza tra treni di categorie diverse. Avendo già fornito gli elementi del capitolo I della PGOS precedentemente (riguardanti la nomenclatura usata), ci soffermiamo ora su:

Parte II: NORME TECNICHE DI ESERCIZIO	
Capitolo IV	Gradi di prestazione - Prestazione dei mezzi di trazione - Massa dei treni
Capitolo V	Norme tecniche per la composizione dei treni di materiale ordinario
Capitolo VI	Velocità massima dei treni e delle locomotive isolate

Tabella 10 - Indice parte II della PGOS

In dettaglio la parte II si articola come segue:

Capitolo IV: Norme Tecniche di Esercizio		
Art. 37	Gradi di prestazione	Ogni linea, a seconda delle resistenze che oppone alla trazione per le sue caratteristiche plano-altimetriche, è divisa nei due sensi di marcia in sezioni. Ad ogni sezione è attribuito un grado di prestazione (da 1 a 31)
Art. 38	Prestazione delle locomotive	Si indica con prestazione il carico massimo [t] che può rimorchiare o spingere, rispettando l'orario programmato. Essi sono valutati in riferimento alle caratteristiche della linea e del mezzo di trazione adottato dall'impresa ferroviaria.
Art. 42	Massa rimorchiata	Non deve superare la prestazione della locomotiva.
Art. 46	Computo della massa rimorchiata	Per materiale rimorchiato si intende: - Per treni viaggiatori: carrozze, bagagli, postali; - Per treni merci: carri di tutte le tipologie; - Locomotive trainate inattive o rimorchi. La massa rimorchiata si ottiene sommando la massa lorda (tara + carico) dei veicoli carichi, la tara dei veicoli vuoti e dei veicoli trainati. Non entra in tale computo la massa dei veicoli di trazione attivi. Viene successivamente arrotondata in frazioni uguali o superiori alla mezza tonnellata.
Capitolo V: Norme tecniche per la composizione dei treni in materiale ordinario		
Art. 56	Formazione dei treni	Nella formazione dei treni devono essere prese in considerazione: a. Massima massa ammessa, b. Massima lunghezza ammessa, c. Massa frenata e norme per la frenatura, d. Velocità massima dei veicoli, Eventuali vincoli.

Art. 60	Massima massa e lunghezza massima del materiale rimorchiato	La massa di un treno non deve superare i seguenti limiti: a. Massima prestazione dei mezzi di trazione utili per il suo rimorchio, b. Massima massa ammessa dalla resistenza degli organi di attacco, c. Massima massa ammessa dalla frenatura, d. 1600 t La massima lunghezza rispetto ai vincoli derivanti dal tipo di freno: - Treni viaggiatori con freno continuo: 660 m, - Treni merci con freno continuo: 1000 m.
Art. 61	Massima massa rimorchiata ammessa dalla resistenza degli organi di attacco	Si rimanda all'Impresa ferroviaria il calcolo, prendendo in considerazione le schede tecniche di costruzione dei veicoli a disposizione e le caratteristiche dell'infrastruttura.
Capitolo VI: Velocità massima dei treni e delle locomotive		
Art. 62	Limiti di velocità	Con i treni e con i mezzi di trazione isolati in nessun caso possono essere superati i limiti di velocità consentiti: a) dalla linea o tratto di linea; b) dal mezzo di trazione; c) dall'ubicazione del mezzo di trazione nel treno o da particolari condizioni di esercizio; d) dal tipo di veicoli in composizione; e) dalla frenatura; f) da particolari prescrizioni; g) da prescrizioni di carattere antinfortunistico.
Art. 63	Velocità massima ammessa dalla linea	La velocità massima consentita su ciascun tratto di linea è impostata su limiti riferiti a due, tre o quattro ranghi di velocità massima, a loro volta riferiti a specifici valori di accelerazione non compensata (anc). Si fa eccezione nel caso del binario illegale delle linee a doppio binario non banalizzate (per il quale la velocità massima consentita da ciascun tratto è impostata su limiti riferiti ad un solo rango di velocità con un valore massimo di 90 km/h). I ranghi di velocità massima sono i seguenti: • rango A cui è associato un valore di $a_{nc} = 0,6$ m/s^2; • rango B cui è associato un valore di $a_{nc} = 0,8$ m/s^2; • rango C cui è associato un valore di $a_{nc} = 1,0$ m/s^2; • rango P cui è associato un valore di $a_{nc} = 1,8$ m/s^2.

Tabella 11 - Capitoli IV, V, VI della PGOS

2.2.2. Regolamento Circolazione dei Treni

Si è già accennato come uno dei testi fondamentali per l'esercizio ferroviario sia il Regolamento Circolazione Treni (RCT). Esso è redatto e approvato dalla Direzione

competente del Ministero dei Trasporti ed Infrastrutture e rappresenta un testo completo e pratico riguardante la circolazione e la movimentazione del materiale rotabile nelle diverse situazioni. Tale opera rappresentava fino a pochi anni fa l'unica adottata in esercizio, negli anni più recenti ad esso si affiancano le disposizioni ANSF al fine di avvicinare la normativa italiana a quella europea e garantire livelli di sicurezza sempre maggiori. Le modifiche sostanziali proposte da ANSF verranno analizzate nel *capitolo 3*. Innanzitutto definiamo le Prescrizioni come qualsiasi ordine comportamentale impartito da un operatore responsabile ad un esecutore di manovre. Le Prescrizioni possono essere fornite all'esecutore con i seguenti mezzi:

- con moduli predisposti, tipicamente differenziati da colori diversi. Se non esistono moduli predisposti per quell'azione esistono ulteriori fogli denominati "a tutto servizio" con cui si può impartire qualsiasi Prescrizione. Ad esempio, sulla Ferrovia Canavesana, presso la stazione di Settimo Torinese in direzione Rivarolo, il capotreno consegna un modulo di colore verde al capostazione presente sul luogo. Esso controfirma il foglio certificando il passaggio del treno da una linea a doppio binario ad una a semplice binario ed instradando il convoglio nella tratta di competenza GTT verso Rivarolo.
- con l'Orario di Servizio: esso rappresenta a tutti gli effetti una Prescrizione di orario di partenza ed arrivo allegato a tutte le Prescrizioni per gli addetti alla circolazione.
- con i segnali fissi, descritti in maniera dettagliata nel *capitolo 3*.
- con comunicazioni registrate su appositi supporti tecnologici (in fonia o in grafia).

Si analizzano ora le principali Disposizioni presenti nel testo RCT, da integrare con il Regolamento Segnali (RS) (*paragrafo 3.1*) e Disposizioni ANSF (*paragrafo 3.3*).

Le manovre (articolo 7, RCT)

Un'attività complementare ma fondamentale per la circolazione dei treni è quella delle manovre per la composizione e scomposizione dei treni. Sono interessati a tale Disposizione sia i treni passeggeri sia i treni merci. Per quest'ultimi, al fine di ridurre i costi generali del trasporto ed aumentare la competitività della modalità ferroviaria rispetto alle altre, molti servizi ferroviari merci sono oggi "a treno bloccato" in modo da sostenere i costi elevati delle operazioni di manovra. L'organizzazione della manovra si sviluppa in una serie di fasi e ruoli precisi:

- programmazione: ordini di composizione o scomposizione dei treni, aggiunta di veicoli, sostituzione dei mezzi di trazione, ecc. derivanti da una programmazione derivante dall'Orario oppure da decisioni occasionali del Dirigente di Movimento (DM).
- direzione e sorveglianza: la verifica del rispetto del programma è affidata al DM, demandabile al Capo Treno o al Capo manovra ove esistente.
- autorizzazione: deve essere riferita ad ogni singolo movimento che deve essere condotto solo dopo aver predisposto l'instradamento da parte degli operatori addetti alla circolazione. Sono tipicamente date attraverso segnali, ordini verbali o gestuali oppure per mezzo di radiotelefoni.
- comando: ordine per l'addetto alla condotta ad iniziare il movimento concordato dato dal Manovratore dopo aver ottenuto l'autorizzazione. È responsabilità anche dell'addetto alla condotta di verificare che il movimento possa avvenire senza causare danni a cose o persone.
- esecuzione: è la movimentazione reale in base a quanto concordato nei punti precedenti.

Le manovre possono essere eseguite quando interessano binari indipendenti da quelli interessati da altri movimenti di treni. Gli impianti dotati di tecnologia e risorse infrastrutturali adeguate possono gestire senza particolari difficoltà le esigenze di manovra e di circolazione dei treni mantenendo una gestione dinamica di qualità. Al contrario, gli impianti poveri di risorse devono far fronte a movimenti contemporanei tra loro incompatibili. Per far fronte a tali situazioni la RCT prescrive procedure operative quali:

- le manovre sull'itinerario di arrivo di un treno e sui binari non indipendenti possono continuare fino a quando vengono mantenuti a via impedita i segnali dalla parte del treno atteso in stazione, purché la pendenza media in discesa dalla parte del treno atteso non superi il 15‰.
- le manovre sui binari non indipendenti possono continuare in impianti muniti di Apparati Centrali e segnalamento di manovra che abbiano ricevuto specifica autorizzazione dalle Unità Centrali, a condizione che vengano comunque arrestate a 150 metri dal punto di convergenza degli itinerari e che tale punto sia protetto da segnali alti o bassi.

- le manovre interessanti i deviatoi dalla parte di uscita del treno atteso possono continuare quando la pendenza media fra il segnale di protezione ed il termine dell'itinerario non superi il 15‰ in discesa.
- le manovre oltre il punto protetto dal segnale possono aver luogo quando si è garantita la temporanea sospensione degli arrivi e la manovra si faccia precedere con segnale d'arresto a mano a 200 metri.

Le precedenze (articolo 8, RCT)

Le diverse caratteristiche dei treni per importanza e velocità impongono che un treno debba essere arrestato per lasciarne proseguire un altro nello stesso senso. Tale azione, definita già in sede di progettazione della circolazione, viene definita "precedenza normale". Nel contempo può nascere l'esigenza, dovuta a ritardi o cause diverse, di effettuare una precedenza. È competenza di chi sorveglia la circolazione (DM o DC) individuare il treno ed il luogo atti al trattenimento dell'uno per il sorpasso dell'altro ("precedenza anormale"). Questa disposizione genera naturalmente una variazione nella programmazione dell'orario. La comunicazione deve pervenire non solo agli operatori in macchina e agli uffici predisposti alla circolazione ma anche alla stazione successiva da dove riprenderà la normale successione dei treni. Tale operazione fu motivo di difficoltà nella gestione e comunicazione tra stazioni. Una semplificazione fu adottata con la notifica, volta per volta, del numero del treno in partenza. In assenza di tale riferimento nella successiva stazione ricevente vengono adottate particolari cautele per l'arrivo di un treno non notificato, generando comunque ritardi sulla linea. La soluzione ottimale è stata adottata in tempi recenti con l'introduzione del monitoraggio in tempo reale della posizione del treno. La precedenza può avvenire anche in linea, in appositi spazi dedicati alla movimentazione dei treni.

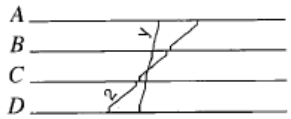


Figura 28 - Precedenza del treno y in posto di movimento in linea (Fonte: RCT, 2018)

Gli incroci (articolo 9, RCT)

Gli incroci sono vincoli che interessano particolarmente le linee a semplice binario. Su tali linee nessun treno può procedere da una stazione se non sono giunti in senso opposto tutti i treni completi previsti in senso inverso. Viene definito "incrocio normale" quello previsto dall'Orario di Servizio (Figura 30).

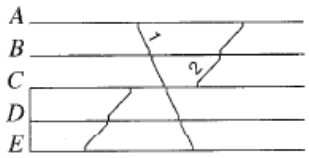


Figura 29 - Incrocio normale nella stazione C (Fonte: RCT, 2018)

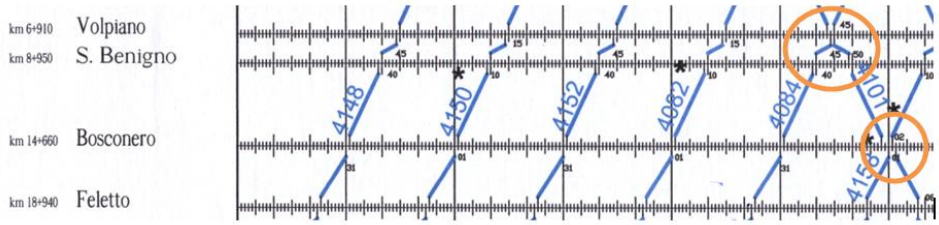


Figura 30 - Incroci programmati presso S. Benigno e Feletto (Fonte: Gruppo Torinese Trasporti)

Anticipo corsa (articolo 15, RCT)

Esso si contrappone in maniera logica al ritardo, costituendo anch'esso una variazione della marcia programmata dei treni. Tuttavia, mentre il ritardo non è previsto e quindi genera una sofferenza sull'esercizio, l'anticipo si attua in modo indotto e quindi solo in condizioni programmate e perciò ottimali. La motivazione di un anticipo della corsa deve essere motivato da possibili vantaggi di gestione o di regolarità, e comunque non deve risultare le regola ma l'eccezione. L'anticipo deve essere preventivamente concordato fra i DM di due o più stazioni successive coinvolte nella circolazione; costanti variazioni nel tempo imposte dai DM sono comunicate alla direzione dell'esercizio che provvederà ad uno studio di modifica dell'orario. Di norma, l'anticipo corsa è applicato ai treni merci che non possiedono prescrizioni particolari, ai treni viaggiatori non è applicabile per l'obbligo giuridico dell'impresa ferroviaria nel rispettare il programma annunciato al pubblico.

Le interruzioni di binario e la circolazione a binario unico su linea a doppio (articoli 18 e 19, RCT)

Con il tempo e il passaggio del materiale rotabile la linea si usura e quindi necessita di manutenzione. Dovendo essa richiedere degli intervalli orari crescenti al crescere del traffico, ci troviamo nella situazione in cui più cresce il traffico più esteso deve essere il periodo di chiusura della linea per manutenzione. Questa genera contrasti lavorativi tra chi gestisce il servizio e chi pianifica ed attua la manutenzione. L'interruzione del binario può avvenire in base a programmazione dall'Orario di servizio (IPO – Figura 31) e per esigenze non programmate di natura accidentale. Per quelle programmate il DM comunica alle stazioni che

delimitano il tratto l'inizio dell'interruzione del binario. Esso è correttamente protetto da segnali d'arresto fino al termine dell'interruzione. L'interruzione avviene quando il titolare dell'intervento comunica per iscritto il "nulla osta" alla ripresa della circolazione. La stessa cosa avviene per l'interruzione non programmata, con la differenza che il DM deve collocarle, per quanto possibile, in spazi liberi da treni. Le interruzioni normalmente determinano o l'interruzione totale del servizio oppure riversano sul binario attiguo l'intera circolazione, se dotato di tecnologia per la banalizzazione del binario. La circolazione sarà in quest'ultimo caso regolata con blocco telefonico limitatamente al tratto ridotto a binario unico.

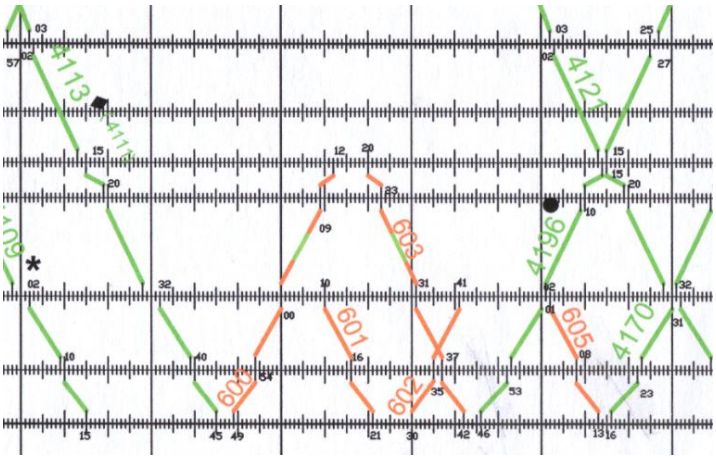


Figura 31 - IPO nella tratta Rivarolo - Settimo. Le linee arancioni indicano i carrelli di manutenzione (Fonte: Gruppo Torinese Trasporti)

La circolazione dei carrelli (articolo 20, RCT)

Per l'attività di manutenzione della linea si impiegano particolari veicoli aventi caratteristiche di buona maneggevolezza e funzionalità, denominati "carrelli" o "mezzi d'opera". La loro immissione in linea ed il loro movimento sono funzione della necessità del lavoro da eseguire. Il loro ingresso può avvenire con protezione affidata ai DM o in regime di interruzione di binario. La protezione da parte del DM è di norma concordata con l'addetto alla circolazione del carrello e in uno spazio temporale preciso sul binario individuato. Il binario di linea sul quale agisce il carrello risulta non impegnabile da qualsiasi altro treno fino all'avvenuto ricovero del carrello stesso. Esistono particolari segnalazioni luminose "C" per identificare l'interruzione del binario e la presenza del carrello su di esso. La presenza di carrelli influisce notevolmente sulla capacità della linea e sulle prestazioni del sistema, aggravata dal fatto che la maggior parte di essi circolano con marcia a vista. (Franceschini et al., 2019)

2.2.3. Il treno

Un treno deve possedere necessariamente i seguenti requisiti:

- segnalamento di testa e di coda,
- numerazione individuale,
- documentazione di "scorta",
- personale formato alla condotta e alla scorta.

Composizione ed applicazione della PGOS

Il treno è formato da materiale rotabile entro limiti definiti tramite calcolo dettato dalla PGOS. Il minimo è costituito dal solo mezzo di trazione. Sono molteplici gli aspetti legati al limite di composizione, tra cui si evidenziano la caratteristiche fisiche della linea, della capacità dei binari delle stazioni presenti in linea (definita "modulo della linea"), la capacità dei marciapiedi delle stazioni e la resistenza degli organi di attacco. Al fine di esemplificare i concetti esposti, si applicano i concetti fino ad ora esposti tramite il calcolo della composizione sulla Ferrovia Canavesana, avvalendosi della linea guida della PGOS descritte nel *paragrafo 2.2.1*.

Applicazione della PGOS: la Ferrovia Canavesana

Si definisce innanzitutto il grado di prestazione massimo (articolo 37) individuabile nelle Fiancate Principali: sulla linea il massimo si individua tra Torino Lingotto e Torino Porta Susa pari ad un grado 14. Questo deve risultare inferiore al grado di prestazione massimo offerto dal mezzo di trazione (articolo 45) che, per i veicoli oggetto di studio, corrisponde al massimo ammissibile, ovvero 31. Questo preclude di poter non calcolare la prestazione massima di una locomotiva come esposto nel *paragrafo 1.2.2* in quanto la PGOS fornisce già un risultato utilizzabile per i successivi calcoli. Ovviamente quanto riportato nella normativa è frutto di dati empirici e operazioni che ricalcano le normali procedure per definire la prestazione delle locomotive, al contempo la velocità e la praticità della PGOS ha come svantaggio la perdita di ulteriori informazioni che potrebbero essere di interesse all'impresa ferroviaria. Si procede successivamente al computo delle masse (articolo 46): per la definizione si sono utilizzati i dati provenienti dalla scheda tecnica di Alstom, considerando due automotrici e una carrozza (caso di composizione in singolo Ale 501 - Le 220 - Ale 502) o di quattro automotrici e due carrozze in composizione accoppiata di due convogli. Si escludono dal calcolo la composizione a tre convogli in quanto: per le esigenze della domanda sono sufficienti solo due convogli, salvo particolari eccezioni, e d'altra parte non si avrebbe

materiale rotabile sufficiente per la circolazione con tre convogli, connesso alle esigenze di fermo di per manutenzione. Nell'escludere la composizione a tre convogli si tiene conto anche della lunghezza delle banchine di stazione, non menzionata nella PGOS ma derivante dallo studio della linea. Per la Linea Canavesana esso riveste un particolare problema, avendo pesanti limitazioni sulla lunghezza massima ammissibile da poter ospitare nelle località di servizio. Nel computo della massa rimorchiata vengono conteggiate la massa lorda (tara più carico) dei veicoli carichi, la tara dei veicoli vuoti, la massa dei mezzi di trazione inattivi. Si esclude la massa dei mezzi di trazione attivi o trainanti se stessi. Si procede ora con il calcolo della composizione (articolo 60), applicando gli articoli della PGOS necessari a comprendere tutti gli elementi di limitazione:

A. massima prestazione dei mezzi di trazione utili per il suo rimorchio (articolo 45): già definita pari a 31, superiore al massimo grado di prestazione della linea (pari a 14);
B. massima massa ammessa dalla resistenza degli organi di attacco (articolo 61): essa deve essere stabilita dalle imprese ferroviarie secondo specifiche analisi tecniche anche basate sulle caratteristiche delle linee. In assenza di dati precisi si può far riferimento ai valori cautelativi della Tabella 22. Tale resistenza è un elemento che influisce in modo particolare per i treni merci rispetto i treni viaggiatori, e costituisce per i primi un limite notevole per la composizione. Nella Ferrovia Canavesana, per il trasporto passeggeri con TTR Ale 501 - Le 220 - Ale 502, non si hanno particolari problemi in quanto il limite risulta molto alto (1580 t).
C. massima massa ammessa in frenatura: la frenatura, come esposto nel *paragrafo 1.3*, riveste un ruolo critico nell'esercizio. Si è deciso perciò, dopo svariate revisione della PGOS, di comprendere tale limite in termini di semplice lunghezza massima per quanto riguarda la composizione e influire maggiormente sulla velocità ammessa in linea data la composizione qui calcolata (come si vedrà nell'articolo 62). La frenatura continua tipo viaggiatori fornisce un unico valore limite di 660 m.
D. 1600 t, imposto da RFI.

Successivamente, data la composizione, bisogna stabilire le condizioni di esercizio ed in particolare la velocità (articolo 62). Sono comprese nella PGOS le seguenti limitazioni:

A. velocità massima ammessa in linea (articolo 63): impostata sui limiti di velocità massima dei ranghi, a loro volta riferiti a specifici valori di accelerazione non

compensata (a_{nc}) [8]. Ad essa bisogna comprendere le eccezioni dovute a circolazione su binario illegale o condizioni particolari di esercizio descritte nella RCT e discusse in più paragrafi di questo testo. Dalla Fiancata di Linea il rango più favorevole alla circolazione risulta il B, a cui è associata una velocità massima di 145 km/h.

B. velocità massima dei mezzi di trazione (prima sancito nell'articolo 64, oggi soppresso): affidato alla ditta costruttrice Alstom Ferroviaria, posto pari a 145 km/h.
C. ubicazione dei mezzi di trazione (articolo 65 – tabella 29): le Imprese ferroviarie devono stabilire eventuali limitazioni di velocità dei treni, relativamente all'ubicazione e ai gusti dei mezzi di trazione. Si allegano all'articolo (tabella 32) le prescrizioni di movimento con relative velocità massime, a cura dei Dirigenti di Movimento (DM). Non essendoci particolari condizioni sfavorevoli sulla circolazione nella Linea Canavesana, si imposta tale valore pari a 160 km/h.
D. tipo di veicoli e composizione: prevedendo una circolazione in condizioni di normale esercizio e l'assenza di composizioni fuori standard, data dalla natura dei mezzi, si pone uguale a 160 km/h.
E. frenatura: (capitolo VII, da articolo 67 a articolo 72): si definisce inizialmente il grado di frenatura massimo attraverso le Fiancate di Linea, pari a V nel tratto tra Torino Stura e Torino Porta Susa (articolo 67). Si recuperano i computi della massa frenata dei rotabili e la massa frenata dell'intero treno dalle schede tecniche di Alstom e della massa da frenare (articolo 46 e 71). Successivamente la massa frenata deve essere commisurata alla velocità del treno e ai gradi di frenatura (articolo 72). Si procede con il computo della percentuale minima di massa frenata, pari al rapporto tra la massa frenata del treno (148,5 t, da Alstom Ferroviaria) e la massa da frenare (articolo 46). Tramite la Tabella B dell'articolo 81 (Tabella 12) si mette in relazione questa percentuale con la velocità massima e i gradi di frenatura, trovando il valore di 135 km/h.

8

Rango A cui è associato un valore di $a_{nc} = 0{,}6\ m/s^2$,
Rango B cui è associato un valore di $a_{nc} = 0{,}8\ m/s^2$,
Rango C cui è associato un valore di $a_{nc} = 1{,}0\ m/s^2$,
Rango P cui è associato un valore di $a_{nc} = 1{,}8\ m/s^2$,

Treni serviti da freno continuo tipo viaggiatori
(compresi i treni di mezzi leggeri)

VELOCITÀ MASSIMA ASSOLUTA AMMESSA																									
Gradi di frenatura della linea	Percentuale di massa frenata esistente nel treno																								
	150	145	140	135	130	125	120	115	110	105	100	95	90	85	80	75	70	65	60	55	50	45	40	35	30	25
Ia	150	150	150	150	150	150	145	145	140	140	135	130	125	120	115	110	105	100	95	90	85	80	75	70	65	60
I	150	150	150	150	150	145	145	140	135	135	130	125	120	115	110	105	100	95	90	90	85	80	70	65	60	55
II	150	150	150	150	145	140	140	135	130	130	125	120	115	110	105	100	100	95	90	85	80	75	70	65	55	50
III	150	150	145	145	140	135	135	130	125	120	115	115	110	105	100	100	95	90	85	80	75	70	65	60	50	45
IV	140	140	135	135	130	130	125	125	120	115	110	110	105	100	95	95	90	85	80	75	70	65	60	55	45	40
V	135	130	130	125	125	120	120	115	110	110	105	105	100	95	90	90	85	80	75	70	65	60	55	50	40	35
VI	125	125	120	120	115	115	110	105	105	100	100	95	95	90	85	80	80	75	70	65	60	55	50	40	35	–
VII	115	115	110	110	105	105	100	100	95	95	90	90	85	85	80	75	70	70	65	60	55	45	40	35	–	–
VIII	100	100	100	100	95	95	95	90	90	85	85	80	80	75	70	65	65	60	55	50	45	40	35	–	–	–
IX	90	90	90	90	85	85	85	80	80	75	75	70	70	65	65	60	55	50	45	40	35	30	–	–	–	–

Tabella 12 - Tabella B articolo 81 PGOS

Si considera come velocità massima il minimo valore dettato da precedenti cinque punti.

Si riportano ora le tabella dei calcoli effettuati per la singola e la doppia composizione dei treni Ale 501 – Le 220 – Ale 502 sulla linea Canavesana (Tabella 13 e Tabella 14).

Ale 501 - Le 220 - Ale 502										
Art. 37	Grado prestazione massimo			**14**	tra To Lingotto e To Porta Susa					
Art. 45	Prestazione delle automotrici			Grado di prestazione max			**31**	OK		
Art. 46	Computo massa rimorchiata			Automotrice		26	t	vuoto		
						52	t	x2 automotrici		
				Carrozza		15	t	vuoto		
				Totale convoglio		41	t			
				Peso in ordine di marcia =				44	t	
Art. 60	A. Massima prestazione locomotive utili per il suo rimorchio			vedi art. 45		Grado di prestazione max			31	
Composizione									OK	
	B. Massima massa ammessa dalla resistenza degli organi di attacco			vedi art. 61		massima massa [t]		massa rimorchiata [t]		
					Tab. 22	1580		41		
									OK	
	C. Massima massa ammessa in frenatura			vedi art. 73		lunghezza massima [m]		lunghezza prevista [m]		
						660		51,9		
									OK	
	D.			massa massima						
				1600	t	OK				
	Composizione:			Ale 501 - Le 220 - Ale 502			**singola**			
	Posti a sedere:		169							
Art.62	A. Velocità massima ammessa dalla linea			Art. 63						
Velocità					Rango	B		da Fiancata di Linea		
					Vmax	145	km/h			
	B. Velocità massima dei mezzi di trazione			Art. 64	Ale 501 - 502					
					Vmax	160	km/h	da Fascicolo Tecnico		
	C. Ubicazione mezzi di trazione			Art. 65	Tabella 29					
					Vmax	160	km/h			
	D. Tipi di veicoli e composizione			Art. 66						
					Vmax	160	km/h			
	E. Frenatura			Cap. VII						
				Art. 67	Grado frenatura		massimo	**V**		
					Tra To Stura e To Porta Susa					
				Art. 69	Massa frenata dei rotabili		a vuoto	26	t	
							a carico	29	t	
				Art. 71	Massa frenata treno			66	t	
				Art. 70	Massa da frenare			44	t	
				Art. 72	Percentuale minima di massa frenata (art.81 Tabella B)			**150%**		
					Velocità massima assoluta ammessa rispetto la frenatura			135	km/h	
								art. 81 Tab. B		
	Velocità massima =		**135**	**km/h**						

Tabella 13 - Applicazione PGOS: Linea Canavesana, composizione singola TTR Ale 501 - Le 220 - Ale 502

2 accoppiati Ale 501 - Le 220 - Ale 502										
Art. 37	Grado prestazione massimo			**14**	tra To Lingotto e To Porta Susa					
Art. 45	Prestazione delle automotrici			Grado di prestazione max			**31**	OK		
Art. 46	Computo massa rimorchiata			Automotrice		26	t	vuoto		
						104	t	x4 automotrici		
				Carrozza		15	t	vuoto		
				Totale convoglio		67	t			
				Peso in ordine di marcia =				73	t	
Art. 60	A. Massima prestazione locomotive utili per il suo rimorchio			vedi art. 45		Grado di prestazione max			31	
									OK	
Composizione	B. Massima massa ammessa dalla resistenza degli organi di attacco			vedi art. 61		massima massa [t]		massa rimorchiata [t]		
					Tab. 22	1580		73		
									OK	
	C. Massima massa ammessa in frenatura			vedi art. 73		lunghezza massima [m]		lunghezza prevista [m]		
						660		103,8		
									OK	
	D.			massa massima						
				1600	t	OK				
	Composizione:			Ale 501 - Le 220 - Ale 502			**2 accoppiate**			
	Posti a sedere:		338							
Art.62	A. Velocità massima ammessa dalla linea			Art. 63						
					Rango	B		da Fiancata di Linea		
					Vmax	145	km/h			
	B. Velocità massima dei mezzi di trazione			Art. 64	Ale 501 - 502					
					Vmax	160	km/h	da Fascicolo Tecnico		
	C. Ubicazione mezzi di trazione			Art. 65	Tabella 29					
					Vmax	160	km/h			
	D. Tipi di veicoli e composizione			Art. 66						
					Vmax	160	km/h			
Velocità	E. Frenatura			Cap. VII						
				Art. 67	Grado frenatura		massimo	**V**		
					Tra To Stura e To Porta Susa					
				Art. 69	Massa frenata dei rotabili		a vuoto	54	t	
							a carico	70	t	
							Tabella C, Quadro 4bis			
				Art. 71	Massa frenata treno			132	t	
				Art. 70	Massa da frenare			73	t	
				Art. 72	Percentuale minima di massa frenata (art.81 Tabella B)			181%		
					Velocità massima assoluta ammessa rispetto la frenatura			135	km/h	
								art. 81 Tab. B		
	Velocità massima =		**135**	**km/h**						

Tabella 14 - Applicazione PGOS: Linea Canavesana, composizione doppia TTR Ale 501 - Le 220 - Ale 502

Numerazione

Ciascun treno deve essere contraddistinto da un numero. La disponibilità della numerazione, inserita dapprima nella Prefazione Generale all'Orario di Servizio in funzione della funzione del treno, viene stabilita e diramata dal Gestore dell'Infrastruttura, da tale numerazione devono essere individuabili i treni viaggiatori, i treni merci, i treni ordinari e straordinari, e tutte le altre tipologie di treni circolanti. Per consuetudine i treni sono pari in direzione sud-nord ed est-ovest; dispari per i treni viaggianti da nord-sud e ovest-est[9]. L'attuale modernizzazione del sistema ferroviario ha reso superati i Fascicoli Orario, oggi si fa riferimento alle tracce orarie che indicano non solo le caratteristiche proprie dell'orario - 8tempi di percorrenza, fermate, ecc.) ma assumono la funzione di indicazione di pedaggio che l'Impresa ferroviaria è tenuta a corrispondere al Gestore dell'infrastruttura per l'utilizzo della traccia stessa . (Franceschini et al. , 2019). È utile che ci sia una corrispondenza univoca tra un treno e il suo numero, sia per gli aspetti economici di costo delle tracce, sia per l'implementazione di tutti i dispositivi di comunicazione e sicurezza nella circolazione, sia per una facilitazione di individuazione del treno da parte dell'utenza. Il numero identificativo è riportato nel documenti di scorta del treno.

Documento di scorta

Negli ultimi anni si è proceduto con la sostituzione di pesante ed ingente documentazione con un unico materiale denominato "Documento Treno Unificato". Un altro documento importante è denominato "Lista Veicoli": un elenco dei veicoli in composizione al treno con tutti i dati caratteristici: numero, massa, natura del carico, ecc. Tutti i documenti sono attualmente in rielaborazione su supporti informatici, cercando di dare completezza ed unità all'apparato, unendo gli aspetti tecnologici legati alla conoscenza in tempo reale della circolazione in linea. È stata introdotta quindi la "Scheda Treno" che riporta, per ciascun treno, gli orari di passaggio da ciascuna località di servizio, le fermate e le specifiche velocità di marcia per ciascun tratto di linea, in relazione alle limitazioni già esposte nell'applicazione alla PGOS. Riassumendo oggi i documenti preposti alla circolazione del treno sono:

- fascicolo di Linea,
- scheda Treno,
- "Prescrizioni" (a cura di RFI) e "Tecniche" (a cura dell'Impresa ferroviaria),

[9] La convenzione determina i treni pari come quelli che si avvicinano geograficamente a Parigi. A causa di una traduzione errata, nell'ambito ferroviario si indica con verso pari quello "vers Paris".

- riepilogo Prescrizioni, ad uso più immediato ed intuitivo del personale di condotta del treno.

Il personale di scorta

Il personale necessario per ciascun treno è costituito da:

- personale di condotta: normalmente composto da un solo operatore, il Macchinista;
- il Capotreno: che agisce ed interviene in accordo con le Disposizioni regolamentari. Attualmente le norme del Regolamento per la Circolazione Ferroviaria emanato da ANSF prevedono l'obbligatorietà del Capotreno solo sui treni viaggiatori.

3. Segnalamento, circolazione nelle stazioni e sicurezza nell'esercizio ferroviario

3.1 Il segnalamento

Nell'esercizio ferroviario uno degli aspetti più delicati è stabilire la comunicazione tra il personale di terra (Dirigenti di Movimento / DM o Dirigenti Centrali Operativi / DCO) che gestiscono la circolazione e i macchinisti (o Agenti di Condotta / AdC) che devono condurre il treno rispettando rigorosamente le istruzioni comunicate. Riguardano soprattutto ordini legati alla sicurezza della circolazione e normalmente non sono prevedibili a priori ma contingenti alle esigenze di esercizio. Negli ultimi anni è stata racchiusa l'intera normativa di riferimento in ambito di segnalamento all'interno del *Regolamento segnali* (RS), redatto da RFI per la circolazione sull'intera Rete Nazionale. Esiste attualmente una classificazione dei segnali utilizzati nell'esercizio in relazione alle caratteristiche fisiche di ciascuno di essi, al loro posizionamento e alla loro funzione:

- segnali fissi (detti anche "segnali laterali"): stabilmente fissati al terreno,
- segnali annessi ai treni: in testa o in coda,
- segnali a mano (lanterne, bandiere, ecc.),
- segnali sussidiari (tavole di orientamento, risuonatori, ecc.),
- segnali accessori (traversa limite, tabelle, ecc.).

Nei successivi paragrafi verrà dato maggiore spazio ai segnali attualmente in uso oggi, utili alla direzione dell'esercizio dell'impresa ferroviaria e al gestore dell'infrastruttura. Tale capitolo comprende aspetti riguardanti sia il solo esercizio, sia il rapporto tra esercizio e manutenzione: uno degli aspetti più delicati nella movimentazione del materiale rotabile è il passaggio tra la linea e i binari di manutenzione. In particolare l'ANSF, di cui verrà dedicato un paragrafo all'interno di questo capitolo, prescrive il possesso delle patenti LEM e A4 per i manovratori. Il valore aggiunto di questo alto grado di formazione consiste nella conoscenza di particolari segnali, acustici e visivi, che devono essere utilizzati durante queste manovre per garantire la sicurezza delle persone che operano a distanza ravvicinata con il materiale rotabile. Normalmente solo i macchinisti possiedono tali patenti ma essi sono già impegnati nella circolazione dei treni. Perciò per eseguire il passaggio di binari dall'esercizio alla manutenzione è necessario che l'impresa ferroviaria:

- abbia pianificato i turni del personale al fine di garantire delle finestre per i macchinisti dedicate alla movimentazione del materiale rotabile,
- abbia personale qualificato nella conoscenza del segnalamento di manovra (patente A4),
- abbia pianificato gli ingressi e le uscite tra i due spazi in modo da non creare colli di bottiglia,
- segua esattamente le prescrizioni ANSF al fine di garantire la sicurezza degli operatori.

In generale i segnali devono possedere le seguenti caratteristiche:

- l'indicazione deve essere inequivocabile, chiara, percettibile a distanza prestabilita (RS, 2016),
- devono essere o ad unico "aspetto", ovvero non manovrabili, oppure a più aspetti alternativi e quindi manovrabili a distanza dal personale addetto alla circolazione,
- i colori utilizzati sono quelli che meglio si adattano alla possibilità percettiva dell'occhio umano. Attualmente in uso sulla Rete Nazionale i colori sono rosso, per le indicazioni restrittive, giallo, per le indicazioni cautelative e verde per le indicazioni liberatorie. I colori possono essere presenti isolati oppure in combinazione tra loro ed inoltre possono essere a luce fissa o lampeggiante. Il cadenzamento del lampeggiamento è fissato a 60 pulsazioni al minuto.

Attualmente è oggetto di studio dell'UIC l'omogeneizzazione dei segnali nella Comunità Europea. Negli anni '90 l'UE avviò l'organizzazione di un progetto denominato ETCS che prevede anche la standardizzazione del sistema di comando del treno e il segnalamento al fine di favorire l'integrazione e l'interoperabilità della circolazione del materiale rotabile da un Paese europeo all'altro.

Dove e perché si dispongono i segnali

I segnali sono volti a perseguire i seguenti obiettivi:

- posti prima di una stazione o di un bivio, o altre località di servizio in cui sono presenti dei deviatoi, sono volti a proteggerle dai treni provenienti dalla linea. In tal caso sono denominati "segnali di protezione".

- posti sui binari delle località di servizio, ove il treno può ricevere il segnale di autorizzazione di movimento (*movement authority* - MA) per l'ingresso in linea. In tal caso sono denominati "segnali di partenza" o "di blocco".
- in linea, al fine di suddividerla in sezioni di blocco, in modo da permettere la presenza di più treni tra due stazioni successive. In tal caso sono denominati "segnali intermedi" o "di fine sezione".
- posti in prossimità dei passaggi a livello.
- posti in prossimità degli scambi in linea (ad esempio per gli stabilimenti raccordati).

Sulle linee a doppio binario i segnali sono posti a sinistra del binario, se sono rivolti a treni percorrenti il binario legale (circolazione a sinistra) sono "a vela tonda". I segnali volti alla circolazione illegale sono posti a destra del binario e sono "a vela quadrata". I segnali in galleria non sono dotati di vela (SegnaliFS, 2019). Innanzitutto i segnali si classificano in segnali di 1ª categoria e segnali di avviso: i primi sono posti in posizione ravvicinata al punto protetto e non devono mai essere oltrepassati in caso di mancata MA; i segnali di avviso sono antecedenti ai segnali di 1ª categoria e hanno la funzione di anticipare al macchinista le indicazioni successive. A seconda della velocità massima adottata in linea e delle caratteristiche altimetriche di essa (e quindi alle distanze di frenatura, *capitolo 1*), il Regolamento Segnali prescrive le seguenti distanza fra i segnali di avviso e i rispettivi segnali di 1ª categoria (Tabella 15 - Figura 32):

Velocità massima della linea	Pendenza della linea	Distanza fra i segnali (*d*)
Rango A: ≤ 110 km/h e Rango B o superiore: ≤ 120 km/h;	≥ 10 ‰ in salita	800 m
	< 10 ‰ in salita	1000 m
Rango A: > 110 km/h e Rango B o superiore: > 120 km/h;	≥ 10 ‰ in salita	1000 m
	< 10 ‰ in salita	1200 m

Tabella 15 - Distanziamento tra due segnali (Fonte: Regolamento Segnali RFI, 2016)

Figura 32 - Distanza fra segnali di avviso e rispettivi segnali di 1^a categoria (Fonte: http://segnalifs.it)

dove il segnale di avviso ricade in corrispondenza o nelle vicinanze del segnale di 1ª categoria (la distanza tra due segnali di 1ª categoria è al più 1500 metri), essi vengono uniti e si parla di "avviso accoppiato".

I segnali di prima categoria si classificano ulteriormente in:

- Segnali di partenza di 1ª categoria: I segnali di partenza devono essere posizionati oltre il punto di normale fermata presso la località di servizio, e dipende fortemente dalla visibilità e dalla planimetria della stazione. Se i segnali sono posti a protezione di uno scambio indirizzante ad un binario tronco, essi devono essere posti ad almeno 50 metri dal paraurti o dal termine di tale binario.
- Segnali di protezione di 1ª categoria: sono collocati ad almeno 100 metri dal punto che si vuole proteggere: la punta del primo deviatoio, il picchetto limite di manovra, il punto in cui si troverebbe la coda del treno di massima composizione ammessa in linea (vedi PGOS – *capitolo 2*). Per la protezione dei passaggi a livello è prescritta una distanza di 50 metri da essi. Nelle linee elettrificate è d'obbligo porli antecedentemente ai portali T.E. .

I segnali sono di tipo luminoso e sono costruiti con più fari montati su uno schermo nero bordato di bianco. Essi sono posti o su pali stanti oppure sui portali della linea elettrica o alle pareti delle gallerie. Per facilitarne la visione, i fari sono protetti da tubi di protezione ai raggi solari. Le luci cromatiche utilizzate sono rossa, gialla e verde ed inoltre possono essere fisse o lampeggianti, singole o accoppiate. Si tratta generalmente di led posti all'interno di una lente. Il raggio luminoso è fatto passare attraverso una serie di filtri dicroici che ne permettono l'invio verso l'esterno.

I segnali di 1ª categoria possono presentare tre aspetti:

- rosso: l'agente di condotta deve obbligatoriamente fermarsi,
- verde: l'agente di condotta può proseguire sulla linea,
- rosso su verde: la via libera è confermata ma con limitazione di velocità prescritta dal precedente segnale di avviso,

i segnali di avviso ("rappel") possono presentare sei aspetti:

- giallo fisso: il successivo segnale è a via impedita, il segnale può essere superato alla massima velocità,

- giallo lampeggiante: il successivo segnale è a via libera, il segnale può essere superato alla massima velocità. L'AdC deve ritenere che si trova a distanza di frenatura ridotta rispetto ad un ulteriore segnale di 1ª categoria,
- verde: la via è libera, il successivo segnale è di via libera senza limitazione di velocità
- giallo su verde fisso: la via è libera. Preavvisa un segnale a via libera con limitazione di velocità a 30 km/h,
- giallo su verde lampeggianti contemporaneamente: la via è libera. Preavvisa un segnale di via libera con limitazione di velocità a 60 km/h,
- giallo su verde lampeggianti alternativamente: la via è libera. Preavvisa un segnale di via libera con limitazione di velocità a 100 km/h,

Nel caso in cui il segnale di avviso risulti spento, l'agente di condotta può oltrepassarlo considerando come se il segnale proiettasse luce gialla, ovvero considerando la via impedita (SegnaliFS, 2019). I segnali devono essere visibili a 200 metri se la velocità massima è uguale o maggiore a 90 km/h, a 150 metri se inferiore. La direzione tecnica di RFI permette distanze minori in condizioni particolari della linea, previa diminuzione della velocità e facendo riferimento al seguente abaco (Figura 33):

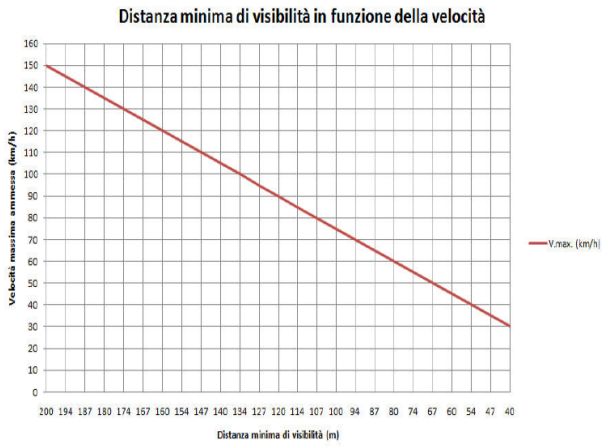


Figura 33 - Distanza minima di visibilità dei segnali (Fonte: Regolamento Segnali RFI, 2016)

3.1.1 Tavole di orientamento

Tutti i segnali sono preceduti da tavole di orientamento volte ad attirare l'attenzione dell'agente di condotta. Esse sono di tipo distanziometrico e rifrangenti. Presentano bande orizzontali se poste prima di segnali di avviso, bande oblique se poste prima di segnali di 1ª categoria, oblique con una linea gialla se poste prima di segnali permissivi o segnali

accoppiati o prima di passaggi a livello o località di servizio (Figura 34). Ogni banda rappresenta una distanza di 50 metri dal segnale (SegnaliFS, 2019).

Figura 34 - Tavole di orientamento (Fonte: Regolamento Segnali RFI, 2016)

3.1.2 Segnali di limitazione di velocità e indicatori di partenza

Posti prevalentemente in partenza dalle stazioni, i segnali di 1ª categoria possono essere accoppiati ad uno schermo nero con bande orizzontali, con significato:

- nessuna striscia orizzontale (o assenza del pannello): velocità massima consentita a 30 km/h,
- 1 striscia accesa: velocità massima a 60 km/h,
- 2 strisce accese: velocità massima a 100 km/h.

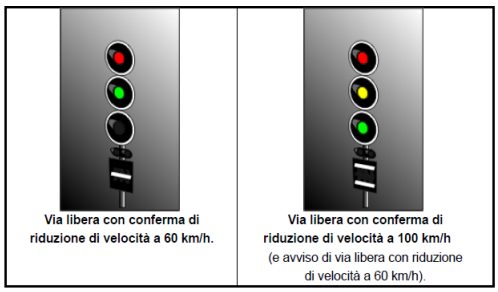


Figura 35 - Segnali di limitazione di velocità (Fonte: Regolamento Segnali RFI, 2016)

Le limitazioni di velocità permanenti sono prescritte da segnali triangolari posti sotto il segnale di partenza, indicanti il numero della velocità da adottare (SegnaliFS, 2019).

Per la partenza dalle stazioni si adottano ulteriori segnali, alti o bassi, che indicano la MA con seguente significato (Figura 36):

Figura 36 - Segnali di partenza (Fonte: Regolamento Segnali RFI, 2016)

La fine di una località di servizio è indicata con apposito segnale (Figura 37):

Figura 37 - Segnale di fine località di servizio (Fonte: Regolamento Segnali RFI, 2016)

3.1.3 Indicatori di direzione

Presso le stazioni e i bivi, i segnali sono accoppiati da schermi neri indicanti numeri luminosi riferiti alla direzione a cui si riferiscono i segnali. Nelle Fiancate Principali (*capitolo 2*) sono indicate le direzioni che il treno deve seguire. In tal caso è compito dell'agente di condotta verificare il corretto istradamento del treno. Nei Fascicoli Orario, presso la simbologia grafica delle località di servizio, sono indicati dei numeri riquadrati che devono corrispondere al numero visualizzato nel pannello luminoso in linea. Per aiutare maggiormente la comprensione dei macchinisti si utilizzano anche i segnali a candeliere (Figura 38):

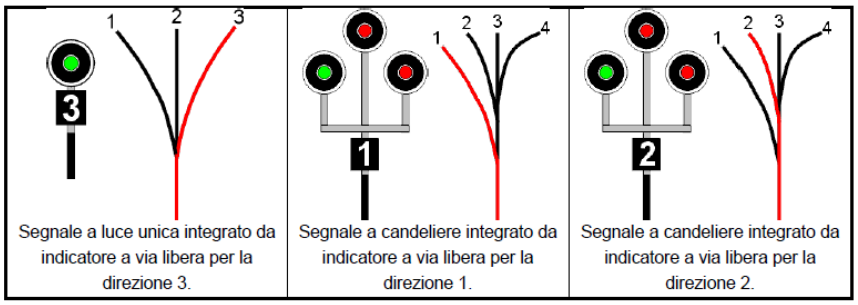


Figura 38 - Indicazioni di itinerario (Fonte: Regolamento Segnali RFI, 2016)

Per i binari tronco, o i binari esterni al fabbricato viaggiatori, sono posti dei segnali detti "ripetitori". Essi corrispondono ad un doppio segnalamento in cui il primo comanda la partenza dal binario fuori dal fabbricato e il secondo comanda la partenza dal binario si stazione. Essi sono contrassegnali da un cartello riportante la scritta "RIP" come in Figura 39:

Figura 39 - Segnale ripetitore (Fonte: Regolamento Segnali RFI, 2016)

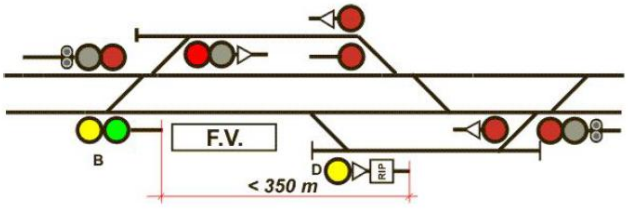


Figura 40 - Schema del segnalamento di ripetizione (Fonte: Regolamento Segnali RFI, 2016)

Le località di servizio munite di segnalamento a ripetizione sono indicate nel Fascicolo Orario della Linea (SegnaliFS, 2019).

3.1.4 Indicazione con lettere

Talvolta i segnali possono essere accoppiati a lettere luminose con i seguenti significati:

- la lettera "P" rappresenta la Permissività. Indicano l'autorizzazione al Macchinista di poter passare un segnale di 1ª categoria indicante via impedita in caso di sosta prolungata (recentemente ANSF ha fissato la tempistica della sosta a 10 minuti, in assenza di contatto telefonico con il DM/DCO di competenza). Il macchinista è autorizzato a procedere a vista (30 km/h) fino al segnale successivo.

Figura 41 - Indicazione di permissività (Fonte: Regolamento Segnali RFI, 2016)

- la lettera "T" rappresentata sotto la via impedita, rappresenta la necessità di comunicazione telefonica con il DM o DCO di competenza.
- la lettera "D" rappresentata sotto la via impedita, rappresenta una località di servizio impresenziata in cui è imposta la fermata e la comunicazione con il DM di competenza.
- la lettera "A" rappresentata sotto a via impedita, rappresenta la fermata obbligatoria e la comunicazione tra DCO/DM e agente di condotta per il nulla osta di superamento del rosso solo dopo aver attivato il sistema SCMT.

3.1.5 Segnali per le manovre

Già nell'introduzione a *paragrafo 3.1* si è accennato al legame tra il segnalamento alla manutenzione. In particolare i manovratori sono tenuti all'osservanza di regole precise che delimitano il campo della sicurezza nelle operazioni di movimento del materiale rotabile vicino a personale in linea. I segnali a mano sono utilizzati nei binari di comunicazione tra la linea e l'officina, mentre i segnali luminosi possono essere adottati all'interno dell'officina stessa, anche se sono in uso solo presso i centri di grande riparazione.

Segnali alti di manovra

Hanno la caratteristica forma esagonale con bande luminose bianche, ed assumono i seguenti significati (Figura 42):

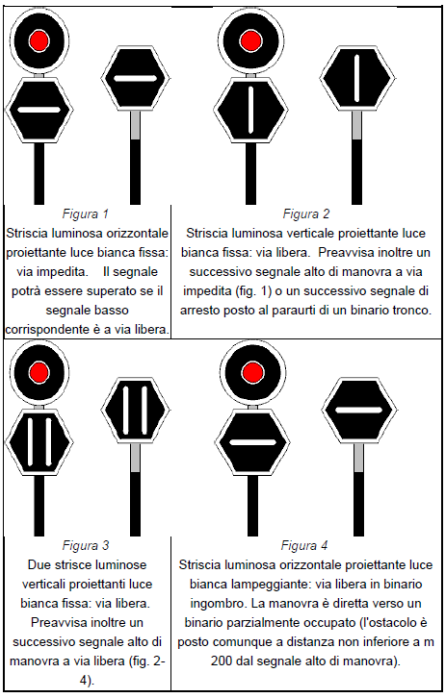


Figura 42 - Segnali alti di manovra (Fonte: Regolamento Segnali RFI, 2016)

Segnali bassi di manovra

Essi rappresentano quelli maggiormente utilizzati nelle officina di manutenzione. I segnali sono comandati attraverso una bandiera rossa (caso diurno) e un faro a luce bianca e rossa (caso notturno), oltre che da fischietti o ricetrasmittenti. I movimenti "avanti" sono comandati muovendo orizzontalmente la bandiera avvolta o il fanale a luce bianca, i movimenti "indietro" sono comandati muovendo verticalmente la bandiera avvolta o il fanale a luce bianca, il comando di "rallentare" è dato attraverso la bandiera ferma estesa o il fanale a luce

rossa fermo, il comando “stop” è fornito muovendo la bandiera estesa o il fanale rosso verticalmente.

Figura 43 - Segnale di manovra "avanti" (Fonte: Regolamento Segnali RFI, 2016)

3.1.6 Segnali di velocità

La velocità massima è indicata mediante pannelli neri con scritte bianche, differenziate a seconda del rango. Tale valore corrisponde a quello riportato nell’Orario di Servizio e nelle Fiancata di Linea. In ordine dall’alto si trovano il rango A, B e C dove previsto. I segnali sono posti sul punto di variazione di velocità nel caso di un incremento di essa, ad adeguata distanza se si tratta di una diminuzione (calcolata con procedimenti visti nel *capitolo 1*) (SegnaliFS, 2019).

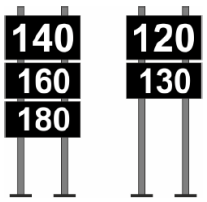


Figura 44 - Indicatori di velocità in linea (Fonte: Regolamento Segnali RFI, 2016)

Vi sono, oltre a quelli illustrati, numerosi segnali sussidiari presso i deviatori, i passaggi a livello, i punti di rallentamento e le situazioni più rare. Essi sono ancora presenti nel Regolamento Segnali RFI in quanto sono presenti soprattutto nelle linee storiche. Tali segnali non sono stati aboliti in quanto forniscono informazioni aggiuntive alla condotta, tuttavia non sono obbligatori in quanto sono sussidiari ai precedenti segnali ma non fondamentali.

3.2 La circolazione nelle stazioni

3.2.1 Le stazioni

Le località di servizio nelle quali si regola la circolazione dei treni sono munite di segnali di protezione e impianti atti ad effettuare le precedenze e gli incroci dei treni. In esse si trovano gli impianti destinati ai servizi al pubblico e alle operazioni per l'esercizio: partenza ed arrivo dei treni, esecuzione delle manovre, formazione e scomposizione dei treni, ricovero e deposito.

Classificazione delle località di servizio

Come visto nel *paragrafo 2.1.2* la Prefazione Generale all'Orario di Servizio fornisce già nell'articolo 3 la distinzione delle località di servizio e nelle Fiancate di Linea sono riportate alcune indicazioni grafiche di esse. Verranno ora esposte alcune peculiarità delle principali località di servizio presenti sulla Rete:

Fermata: si identificano come quelle località in cui i treni fermano solo per la salita e la discesa dei viaggiatori, sprovviste di qualsiasi impianto per regolare la circolazione. Esse non intervengono nel distanziamento dei treni e sono impresenziate o presenziate da un agente amministrativo per i rapporti con il pubblico. Nelle fermate di linee a semplice binario è sufficiente un marciapiede e un piccolo fabbricato, su linee a doppio binario è previsto anche un sovrappasso o sottopasso per evitare l'attraversamento dei binari. Quando nella fermata si svolge anche il traffico merci a carro completo, la località viene dotata di un apposito scalo merci consistente in uno o due binari per il carico diretto, con allacciamento ai binari di corsa e da questi resi indipendenti mediante un opportuno dispositivo d'armamento realizzato mediante comunicazioni di scambi e tronchini di sicurezza.

Posti di movimento: tutte le località di servizio non adibite al servizio del pubblico, provviste di binario di incrocio su linee a singolo binario o binari di precedenza su linee a doppio binario. I posti di movimento sono presenziati da un dirigente di movimento (DM) che interviene nel regolare la circolazione dei treni, coadiuvato da un agente di fatica, addetto alla manovra degli scambi se il posto di movimento non è provvisto di apparato centrale. Sulle linee in regime di Comando Centralizzato del Traffico (CTC) i posti di movimento sono provvisti di apparati centrali telecomandati dal posto centrale ma sono predisposti per essere presenziati da DM in caso di emergenza.

Stazioni di diramazione: sono quelle in cui convergono due o più linee. Il dispositivo del piazzale delle stazioni di diramazione viene concepito come se si trattasse di una stazione intermedia della linea principale e della stazione terminale della linea diramata. Particolare attenzione va rivolta nello studio dei piazzali per la configurazione dell'armamento che deve essere tale da evitare il più possibile interferenze di movimenti ed avere la massima indipendenza degli itinerari.

Bivi: quando la confluenza di due o più linee si realizza fuori dalla stazione. È protetta da segnali fissi di protezione e sono regolati da personale di movimento per regolare la successione di inoltro dei treni dalle varie provenienze. Anche questi impianti sono oggi regolati dal posto centrale. Si cerca di evitare bivi in piena linea, cercando di portare il confluire delle linee nella stazione più prossima, che diventa stazione di diramazione

Salti di montone: nel caso di confluenza di linee a doppio binario ed intenso traffico, in corrispondenza dei bivi, si può dar luogo a sensibili riflessi negativi sulla circolazione e si eseguono perciò manufatti per lo scavalcamento dei binari atti ad eliminare i tagli di circolazione. I salti di montone sono opere d'arte particolarmente inclinate (l'angolo di inclinazione scende fino ad 8°) e molto costose.

Piccole stazioni: le piccole stazioni dispongono di un numero limitato di binari di ricevimento treni utilizzati sia per la circolazione sia per il servizio ai viaggiatori. I binari di ricevimento dei treni, affiancati al binario di corsa, sulle linee a semplice binario, vengono comunemente denominati binari d'incrocio. Sulle linee a doppio binario i binari di precedenza possono essere distinti per le due direzioni di marcia dei treni o promiscui. Nelle piccole stazioni che dispongono di un unico binario di precedenza è preferibile, dal punto di vista dell'esercizio, che esso sia interposto fra due binari di corsa. Per le stazioni con due binari di precedenza la soluzione più razionale per l'esercizio prevede i binari di precedenza distinti per i due sensi di marcia dei treni, ubicati esternamente ai due binari di corsa e frontalmente al fabbricato viaggiatori. Anche le piccole stazioni possono essere impresenziate e telecomandate dal posto centrale.

Stazioni medie: il numero di binari per la circolazione aumenta e di conseguenza si determina la necessità di specializzare un piazzale distinto tra servizio viaggiatori e servizio merci. Generalmente esse costituiscono località di origine e termine di treni e pertanto debbono essere sovente dotate di impianti per il deposito del materiale rotabile in sosta e per i mezzi di

trazione. La confluenza delle linee che si determina nelle stazioni a servizio di centri di media importanza fa sì che le relative stazioni sono spesso di diramazione. E poiché per l'esercizio è normale che nelle stazioni medie si concentrino le coincidenze fra treni (come nel caso di un orario cadenzato integrato – *paragrafo 2.1.3*) risulta opportuno prevedere dispositivi efficienti al fine di consentire la possibilità di movimenti indipendenti e contemporanei di treni e ridurre i perditempo. Nelle stazioni di media importanza si determina una distinzione di compiti fra il personale addetto al movimento (Dirigenti e Deviatori), il personale addetto al servizio delle manovre (Capi piazzale e Manovratori), il personale addetto ai rapporti con il pubblico (Capi gestione, Assistenti di stazione).

Grandi stazioni viaggiatori: un grande piazzale viaggiatori può essere concepito di testa o passante in relazione alla configurazione della linea di accesso e del traffico relativo. Dal punto di vista dell'esercizio la soluzione più conveniente è quella del passante data la maggior facilità di movimento svolto su entrambi i lati, tuttavia per essa bisogna prevedere l'attraversamento della zona urbana con apposite opere d'arte (Vicuna, 1993).

3.2.2 Movimento dei treni nelle stazione

La circolazione dei treni in stazione può essere schematizzata come una duplice ripetuta serie di movimenti che devono rispondere a determinate condizioni di sicurezza e che si riferiscono al percorso dei treni in piena linea e al percorso dei treni nell'ambito delle stazioni. Nell'ambito delle stazioni sono realizzati movimenti di arrivo e partenza dei treni e movimenti di manovra. Nelle stazioni di limitata importanza di solito è svolto un movimento alla volta, nelle piccole o medie stazioni si rende necessario garantire almeno la contemporaneità dei movimenti di manovra e di circolazione nei due sensi. Infine, nelle grandi stazioni, occorrono tecnologie efficienti al fine di garantire la sicurezza della circolazione contemporanea in più fasci di binario.

Itinerari di arrivo, partenza e transito

L'itinerario di arrivo di un treno è il tratto di binario che deve essere percorso dal treno atteso nella stazione e per il quale occorre acquisire le garanzie ritenute necessarie per la sicurezza nei riguardi sia della disposizione dei deviatori sia degli accertamenti di libertà di binario. Per il ricevimento di un treno su un binario provvisto di distinto segnale di partenza, l'itinerario di arrivo si estende (Figura 45) da segnale A al segnale B.

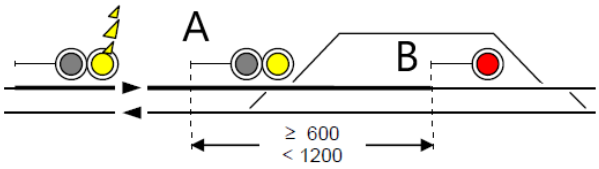


Figura 45 - Itinerario di arrivo (Fonte: Regolamento Segnali RFI, 2016)

Per il ricevimento di un treno su un binario privo di segnale di partenza, o con segnale di partenza comune a più binari, l'itinerario di arrivo si estende fino al primo ente situato oltre il punto di normale fermata del treno di massima composizione. L'itinerario di partenza è il tratto che deve essere percorso dal punto di stazionamento al punto di piena linea. Per il transito si sommano le due condizioni. Nell'esercizio non può escludersi in modo assoluto che un treno in arrivo possa scorrere oltre il punto terminale dell'itinerario di arrivo e pertanto si prevede un tratto di binario di possibile scorrimento e conseguentemente un prolungamento dell'itinerario di arrivo. Tale tratto è denominato "zona di uscita" (Figura 46).

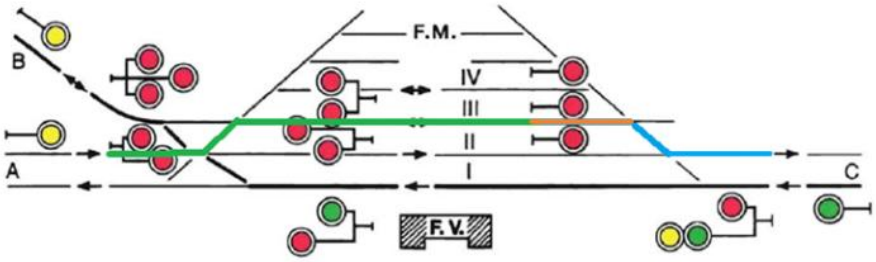


Figura 46 - In verde l'itinerario di arrivo per il treno A, in arancione la zona di uscita, in azzurro l'itinerario di partenza per il binario III (Fonte: Regolamento Segnali RFI, 2016)

La zona d'uscita deve essere considerata alla stregua dell'itinerario del treno in arrivo. La lunghezza della zona d'uscita assume estensione diversa a seconda delle caratteristiche di impianto e può andare fino agli scambi d'uscita o essere limitata a valori compresi fra 50 metri e 300 metri. L'attuale normativa prevede una zona d'uscita di 50 metri quando il binario di ricevimento del treno è provvisto di segnale di partenza distinto per binario e di 100 metri nel caso di binario privo di segnale di partenza o segnale di partenza comune tra binari. L'attuale collegamento di sicurezza, denominato "bloccabile", risponde alla condizione che per rimuovere i deviatoi e gli altri meccanismi dalla posizione richiesta per il movimento del treno, occorre aver disposto a via impedita il segnale. Tale condizione, voluta per l'ingresso del treno, assicura che non può essere modificata la posizione degli scambi finché il segnale di protezione è a via libera, ma non garantisce che non possa essere ridisposto a via impedita

il segnale prima che il treno abbia completamente percorso l'itinerario stesso. Si presenta quindi la necessità di introdurre un collegamento di sicurezza con un ulteriore vincolo per ovviare tale eventualità. A ciò si è provveduto attraverso opportuni dispositivi elettrici che impediscono di modificare l'itinerario predisposto finché il treno non lo ha liberato.

I movimenti interni alla stazione

Uno dei concetti fondamentali per l'esercizio ferroviario nell'ambito delle stazioni è la definizione dei binari indipendenti: la stazione presenta la completa mancanza di comunicazione tra instradamenti. Agli effetti dello svolgimento tra manovre, un binario congiunto mediante comunicazione a quello che deve percorrere un treno si considera indipendente quando i deviatori della comunicazione sono assicurati nella posizione dovuta, cioè per la non confluenza, mediante fermascambio di sicurezza.

Le norme di esercizio riguardanti i movimenti dei treni e manovre in stazione dipendono dalle apparecchiature installate (vedi successivo *paragrafo 3.2.3*) e sottendono al principio generale del rispetto assoluto del segnale di arresto da parte del macchinista. I segnali di protezione delle stazioni sono ubicati normalmente a 100 metri dal punto protetto (deviatoio estremo o picchetto limite di manovra a sua volta posti a 150 metri dal deviatoio estremo) . Le manovre si effettuano entro tali punti protetti. Le manovre, come visto nel *paragrafo 3.1*, sono comandate per mezzo di segnali a mano o segnali bassi luminosi azionati a distanza. Le manovre sui binari non indipendenti devono necessariamente essere sospese in caso di arrivo di un treno, possono invece continuare le manovre su binari indipendenti. Sono permesse le manovre che si svolgono sui deviatoi dalla parte dell'uscita del treno sempre che il punto di convergenza dell'itinerario si trovi a più di 50 metri oltre il termine di itinerario di arrivo, se il binario di ricevimento è provvisto di distinto segnale di partenza, altrimenti 100 metri con segnali di partenza comune ad altri binari (Figura 47) (Vicuna, 1993).

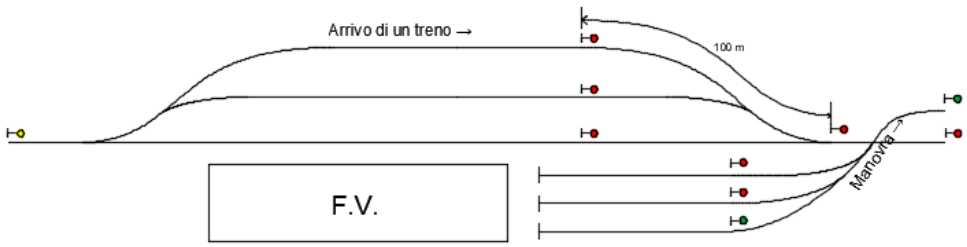


Figura 47 - Manovra ai deviatori

Le manovre di uscita all'atto del ricevimento sono comunque vietate quando la pendenza media della linea al segnale di protezione al termine del binario è superiore al 15‰ in discesa (decreto ANSF 4/2012).

Le manovre simultanee in stazione hanno prescrizioni simili a quelle dei deviatoi appena esposti:

- il punto di convergenza deve essere protetto da segnale di partenza a via impedita, preceduto da avviso, distinto per binario e ubicato a distanza di almeno 100 metri dal punto stesso (Figura 48);
- la stazione deve essere munita di collegamenti di sicurezza i quali, nella disposizione a via libera dei segnali, garantiscono l'indipendenza tra gli itinerari;
- nel tratto di arrivo compreso fra il segnale di 1[a] categoria di protezione e quello di partenza a via impedita la pendenza media del binario non sia superiore a 6‰ in discesa.

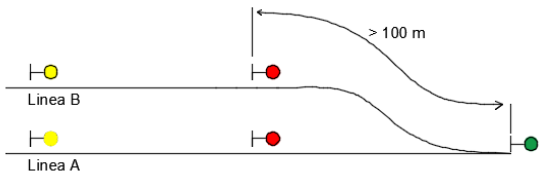


Figura 48 - Manovra itinerari non indipendenti

Nelle linee a semplice binario, allo scopo di evitare incidenti sulla linea, si impone l'obbligo di non ricevere il secondo treno incrociante dopo che il primo treno si sia fermato; a questo scopo il segnale di protezione per l'ingresso del secondo treno non viene aperto se non dopo che il primo treno sia entrato in stazione e si sia fermato (Figura 49).

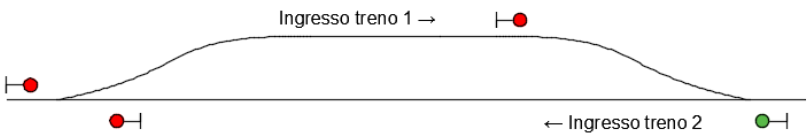


Figura 49 - Manovra in stazione su linee a semplice binario

La normativa italiana in riferimento agli incroci in stazione su linee a semplice binario, in particolare la Direttiva ANSF 1/dir/2010 aggiornata al 23 febbraio 2010, risulta più stringente rispetto ad altri Stati nei quali il ricevimento dei due treni può avvenire simultaneamente con adeguate riduzioni di velocità.

Riassumendo le operazioni volte a garantire la sicurezza nei movimenti nell'ambito delle stazioni definiscono il seguente ciclo:

A. disposizione dei deviatoi interessanti il movimento del treno: la corretta successione di configurazioni che i deviatoi devono assumere è redatta in un programma prestabilito in ogni stazione. Tale documento prende il nome di "Piano schematico" e viene compilato sulla base della planimetria della stazione e del programma di esercizio predisposto in base alle esigenze funzionali dell'impianto.
B. assicurazione dei deviatoi interessanti il movimento del treno: gli organi volti a garantire tale configurazione vengono chiamati "impianti di sicurezza dei deviatoi". Essi vanno dal semplice fermascambio che, con l'estrazione di una chiave, assicura l'ago di un deviatoio al contrago, fino ai complessi apparati centrali elettrici che consentono la manovra a distanza di scambi e segnali.
C. controllo della libertà di itinerario da rotabili e, nell'ambito della visuale libera degli operatori interessati, da ulteriori ostacoli: il controllo della regolarità dell'itinerario predisposto viene effettuato dal dirigente che opera al banco di manovra dell'apparato all'atto stesso della manovra degli scambi per la disposizione dell'itinerario. L'azione dell'operatore è visualizzata su un quadro luminoso e viene facilitata da strisce bianche luminose relative all'itinerario predisposto e strisce rosse per l'identificazione degli itinerari occupati. Prima di manovrare a via libera un segnale è infine necessario accertare che l'itinerario sia libero da manovre o altri veicoli, che siano sospese le manovre che potrebbero interessare l'itinerario e che i veicoli fermi sugli itinerari non indipendenti siano immobilizzati (Vicuna, 1993).

L'organizzazione del movimento in stazione in Italia è di tipo accentrato: l'accentramento delle responsabilità della circolazione nel DM è volto a garantire la sicurezza dell'esercizio. Il DM è responsabile di tutti gli eventi legati alla circolazione dei treni. Il Decreto ANSF n° 4/2012 introduce alcuni alleggerimenti di responsabilità, mantenendo comunque il modello organizzativo tradizionale. In altre Nazioni la circolazione è di tipo decentrato, affidando le responsabilità ad agenti esecutivi diversi e il DM interviene quando sono necessarie modifiche non conformi al programma tramite l'invio di dispacci di sicurezza agli agenti competenti.

3.2.3 L'evoluzione degli apparati in stazione

Parallelamente all'evoluzione dei regimi di circolazione precedentemente esposti, si sono sviluppati apparati sempre più sofisticati nelle stazioni al fine di soddisfare le esigenze di traffico e il passaggio dai sistemi manuali ai sistemi automatici. Per il funzionamento del sistema di regolazione automatizzato occorre fornire all'elaboratore numerosi dati sia in via preventiva, sia in tempo reale.

- Dati fissi: i principali dati fissi forniti sono l'orario dei treni ordinari, compresi quelli periodici, programmati nella zona di giurisdizione con le relative caratteristiche viste nei paragrafi precedenti (composizione, velocità, frenatura, ecc.) e inoltre bisogna trasmettere il coefficiente di priorità fra le diverse categorie di treni. Quest'ultimo aspetto è di notevole importanza in quanto bisogna fornire una guida per l'elaboratore nella soluzione dei conflitti di circolazione che si presentano nella realtà dell'esercizio. A tal fine nella PGOS si sono istituite delle tabelle, denominate "Tabelle dei rapporti di reciproca tolleranza", in cui trovano collocazione i coefficienti di priorità nella regolamentazione dell'esercizio. Oggi le tabelle sono in parte superate, avendo introdotto nell'algoritmo vincoli di tipo economico e contrattuali dato il libero accesso all'infrastruttura da parte di più imprese ferroviarie. Questo presuppone da parte degli operatori calcoli di previsione sulla corsa dei treni nei casi di conflitti di circolazione. Tali calcoli devono derivare anche da ragioni di convenienza, analizzando il singolo caso in relazione al sistema generale di circolazione. Per ciascun treno viene definito un perditempo virtuale ottenuto dal prodotto del perditempo reale per il coefficiente di priorità attribuito al treno stesso, tanto maggiore quanto maggiore è l'importanza del treno. Se in una certa fase dell'esercizio alcuni treni di diversa importanza subiscono ritardi si può calcolare il perditempo globale complessivo come somma dei perditempi virtuali di ciascuno di essi. L'algoritmo di ottimizzazione consente di confrontare in tempo reale la marcia del treno con quelli degli altri, analizzando sia i perditempo globali sia valutando la qualità del servizio erogato nell'intero sistema, considerando meccanismi economici (penalità) in base ai ritardi prodotti o indotti dai diversi soggetti (infrastruttura ed esercizio). La procedura descritta richiede la disponibilità di tutte le informazioni necessarie che devono affluire al calcolatore con tutti i mezzi a disposizione e in modo automatico così da stilare un programma di ottimizzazione in grado di valutare le condizioni di circolazione in tempo reale.

- Dati variabili: i dati variabili attinti in modo automatico derivano dall'orario grafico reale e quindi dalla circolazione attuale sulla linea. In particolare vengono presi in considerazione: dati sulla marcia dei treni in circolazione. Stato degli impianti, aggiornamento sulle situazioni che possono influire sulla circolazione reale dei treni, aggiornamento sulle modifiche temporanee dell'esercizio (Franceschini, 2019).

Apparati automatizzati di stazione

Soprattutto negli impianti più grandi, quando l'esercizio era svolto in base ad accordi telefonici, la gestione della circolazione era piuttosto laboriosa. Inoltre l'aumento del traffico imponeva la necessità di maggiori garanzie per tutelare la sicurezza della circolazione. In un primo momento vennero creati collegamenti tra scambi e segnali per evitare movimenti incompatibili: inizialmente erano di tipo meccanico (ADM) attraverso l'estrazione di una chiave dai fermascambi dei deviatori, successivamente si utilizzò un collegamento di tipo elettromeccanico basato su consensi elettrici tramite relè. Nacquero i primi apparati centrali (ACE) tali da consentire la manovra a distanza degli scambi e dei segnali da un unico posto centrale: la cabina del Dirigente di Movimento (DM). La moderna configurazione degli impianti in stazione si basa su due diversi apparati. I primi sono gli apparati centrali elettrici a leve di itinerario (ACELI), costituiti da leve per la disposizione degli scambi concepite su base di itinerario e alcune leve libere per i singoli scambi: questa tipologia introdusse il concetto di "distruzione semirigida" per cui la liberazione del percorso progredisce con l'avanzare del treno, rendendo immediatamente disponibili i singoli enti per successivi comandi di itinerario. La seconda tipologia di apparati sono gli apparati centrali elettrici ad itinerari (ACEI): con tali apparati sono necessari pochi operatori per gestire stazioni estese, basta infatti premere solo il pulsante del punto iniziale e finale dell'itinerario desiderato. Tuttavia negli ACEI di grandi dimensioni, a causa del grande numero di itinerari previsti, la manovra poteva risultare complessa. Pertanto sono stati introdotti gli ACEIT, ovvero gli ACEI muniti di tabulatore, ossia una tastiera dove l'operatore può formare l'itinerario inserendo il numero del punto iniziale e il numero del punto finale. Quest'ultimi sono attualmente in uso sulla Rete Nazionale, affiancati progressivamente da apparati centrali basati su logica elettronica, ovvero programmata via software, inizialmente definiti apparati centrali statici (ACS) e successivamente apparati centrali computerizzati (ACC). La modularità degli ACC ha permesso nel tempo di aggregare più posti di servizio, estendendo il comando e controllo della sicurezza anche nei tratti di linea: nascono così gli ACCM (Apparati Centrali Computerizzati Multistazione), apparati che di norma gestiscono una linea

o un nodo ferroviario impartendo comandi a distanza e ricevendo controlli sicuri nel Posto Centrale.

Figura 50 - Evoluzione degli apparati di stazione

Questa evoluzione tecnologica ha portato progressivamente a modifiche sostanziali alle modalità di regolazione della circolazione. Si è assistito al passaggio da una gestione locale a una gestione sempre più centralizzata con il telecomando effettuato all'interno di posti centrali. L'evoluzione tecnologica ha reso possibile lo sviluppo di impianti di controllo centralizzati del traffico (CTC evoluti in ACCM – Apparato Centrale e Calcolatore Multistazione) che consentono di accentrare la gestione della circolazione nella nuova figura del Dirigente Centrale Operativo (DCO) che da un unico posto comanda sia il nodo sia la linea (Cerquarelli et al., 2019). Per la massima integrazione degli impianti di una linea o di un nodo da inserire nella giurisdizione dell'ACCM, il Posto Centrale Multistazione può estendere la propria competenza anche sui singoli ACC già esistenti e più periferici e si può interfacciare agli impianti ACEI mediante un dispositivo denominato GEA (Gestore Elettronico Apparati).

3.3 L'Agenzia Nazionale per la Sicurezza Ferroviaria (ANSF)

Negli ultimi anni ha preso sempre più campo il ruolo dell'Unione Europea nella gestione e circolazione ferroviaria, in collaborazione con le possibilità offerte dell'informatica e la volontà di creare una rete ferroviaria europea. Dal punto di vista gerarchico, le Norme europee hanno assegnato il primo livello regolamentare all'ANSF che ha, nel suo lavoro di riordino normativo, emanato in nuovo Regolamento per la Circolazione Ferroviaria (RCF) che contiene i principi del RCT e RS ma ad un livello maggiore di generalità ed astrazione. La trattazione presentata nel *capitolo 2* e *3* si basa già sul RCF. Inoltre la separazione tra gestore dell'infrastruttura e imprese ferroviarie ha richiesto la scrittura di norme di interfaccia atte a disciplinare i rapporti tra le due (ove sono incluse quasi tutte quelle del RS), lasciando il compito al gestore dell'infrastruttura di emanarle. A livello inferiore sono previste Disposizioni o Prescrizioni a cura del gestore dell'esercizio per disciplinare singoli casi di cui hanno la responsabilità. Nonostante gli sforzi fatti per raggruppare ergonomicamente le norme in manuali di mestiere, raccolte in modo semplice e completo, la situazione non è ancora ottimale (Franceschini, 2019). Per sopperire a tale aspetto sono d'aiuto nuove tecnologie informatiche a supporto delle nuove idee di riordino normativo. Nel quadro generale delineato attraverso le Normative europee è previsto che ogni operatore ferroviario debba dotarsi di un Sistema di Gestione della Sicurezza (SGS) per poter ottenere le autorizzazioni o le certificazioni di sicurezza richieste. Uno degli elementi del SGS riguarda la gestione dei rischi ferroviari e delle relative metodologie, applicabili anche alle Norme ferroviarie. In tale ambito ogni nuova norma o una modifica sostanziale deve essere sottoposta ad esame per verificarne l'impatto sul livello di sicurezza ferroviaria. A tale scopo sono utilizzati da ANSF metodi di analisi del rischio sia di tipo qualitativo sia di tipo quantitativo, in base alla complessità dell'innovazione proposta. Un'ulteriore novità formalizzata da ANSF è l'utilizzo del "ritorno d'esperienza", cioè l'inserimento in tali analisi di informazioni contenute nelle banche dati che, in maniera semplice ed accurata, registrano non solo gli incidenti avvenuti ma anche le situazioni anomale che possono rappresentare dei precursori di incidenti ("incidenti mancati" o "near miss") offrendo indicazioni rispetto ai settori in cui è utile intervenire con opportune modifiche normative. ANSF si occupa inoltre di recepire le Specifiche Tecniche di Interoperabilità (STI): apparato normativo europeo armonizzato tra gli stati membri che si occupa di accompagnare l'evoluzione normativa all'evoluzione tecnologica nella visione di un'Europa unita da un sistema dialogante e interconnesso. In particolare è prerogativa di

ANSF portare avanti l'innovazione richiesta dal progetto ERTMS, proponendo e monitorando l'operato dei diversi soggetti nell'innovazione tecnologia della rete.

Da questa introduzione, e dai paragrafi precedenti, si evince come una delle sfide della normativa in ambito ferroviario sia la strada della semplificazione. La semplificazione delle procedure, unita all'affidabilità delle tecnologie in uso, potrà ridurre la casistica dei guasti e la complessità di applicazione. La realizzazione di testi unici dovrebbe accorpare il più possibile Norme presenti su diverse fonti per una semplificazione nella consultazione (Franceschini, 2019).

3.3.1 Normativa ANSF

Il complesso quadro normativo ANSF ricopre tutti i ruoli della gestione del trasporto ferroviario: dall'infrastruttura alla circolazione in linea, dall'organizzazione del personale in stazione alla manutenzione del materiale rotabile. Verranno ripresi gli aspetti trattati nel *paragrafo 2.2.2*, e quindi del RCT, evidenziando i principali elementi di novità introdotti da ANSF nell'ultimo decennio:

Le manovre: l'Agenzia Nazionale per la Sicurezza Ferroviaria ha stabilito vincoli più restrittivi rispetto la possibilità di eseguire manovre su binari non indipendenti, in base al principio che le circolazioni devono avvenire tenendo conto delle attrezzature installate di protezione della marcia dei convogli e delle misure di mitigazione del rischio. In particolare un movimento di manovra può avvenire contemporaneamente se gli itinerari sono indipendenti per le caratteristiche dell'impianto oppure se tale indipendenza è creata per mezzo di collegamenti di sicurezza con i segnali descritti nel *paragrafo 3.1.5*. (Linee Guida ANSF 1/2013).

Le precedenze: la conoscenza esatta della normale successione dei treni non è più ritenuta un prerequisito per assicurare il sicuro distanziamento e gli incroci sulle linee a semplice binario, conservando comunque un valido aspetto riguardo la qualità del servizio offerto e delle possibili implicazioni nell'inserimento di un treno non programmato. Allo scopo di assicurare la sicurezza su tali tratte, e tenere il controllo della successione dei treni, ha preso campo la diffusione di sistemi automatici interfacciati con gli apparati di controllo e comando nelle stazioni capo-tronco. Gli apparati CTC (*paragrafo 3.2.3*) sono stati correlati da dispositivi "train-describer", visualizzando in tempo reale il movimento del treno su mappe satellitari elaborate tramite i dati provenienti dal treno stesso.

Gli incroci: grazie all'attrezzamento delle linee dei sistemi di blocco e della tecnologia CTC, gli incroci fuori dalla programmazione di esercizio, nelle linee a semplice binario, avvengono solo per decisione ed attuazione del DCO supportato dalla tecnologia vista nel *paragrafo 3.2.3*. Sono stati eliminati i moduli per lo spostamento di incrocio, snellendo la procedura e concentrando la decisione e l'attuazione in un unico centro di controllo. Dal 2012 ANSF ha eliminato il termine "incrocio" dal Regolamento Circolazione Treni, rimanendo pur valido il significato nella realtà quotidiana dell'esercizio ferroviario.

La circolazione dei carrelli: la denominazione "carrelli" è stata sostituita da ANSF con la terminologia "mezzi d'opera". È stato istituito un ente predisposto al rilascio delle certificazioni tecniche di idoneità di circolazione (Italcertifer) e dal 2014 tutti i rotabili di questa categoria devono essere iscritti in un Registro Unico Mezzi d'Opera (RUMO), gestito da RFI. Inoltre, nell'ambito della iscrizione normativa da parte di ANSF (Linea Guida ANSF 06/08/2013), possono viaggiare come treni o in composizione a treni i mezzi d'opera aventi le caratteristiche tecniche (frenatura, sistemi di bordo SCMT, ecc.) che ne consentono l'iscrizione nel Registro Immatricolazione Nazionale (RIN) gestito da ANSF stessa.

La circolazione a binario unico su linea a doppio: ANSF ha di fatto vietato la circolazione su binario illegale delle linee non banalizzate, lasciando la possibilità di eseguire tali manovre solo un caso di eventi improvvisi e al solo fine di consentire ai treni già in circolazione di superare il tratto strettamente necessario. Inoltre sono stati posti severi limiti di velocità: 90 km/h se è attivo il SCMT, 50 km/h se il sistema è escluso. La diffusione della banalizzazione comunque è notevolmente diffusa sulla rete e nelle linee non banalizzate il ricorso alla programmazione di interruzione con circolazione illegale è drasticamente diminuito dopo tale regolamentazione (Decreto ANSF 4/2012).

4. La manutenzione

Al giorno d'oggi la manutenzione, nei diversi ambiti, viene concepita come attività programmabile e non più come un lavoro condizionato dal singolo evento di rottura. Ormai la manutenzione è diventata a tutti gli effetti un servizio che l'azienda presta alle proprie attività e non è più considerata un'attività complementare alle attività produttive. Si creano sempre più delle squadre responsabili e competenti che integrano la loro attività nella vita quotidiana dell'azienda. La manutenzione deve programmare, coordinare e controllare le diverse funzionalità dell'impresa, in modo da unire la tecnica propria delle attività manutentive con l'economicità degli interventi. In questo riveste un ruolo di primaria importanza la formazione del personale addetto alla manutenzione, non solo in termini di capacità professionale ma anche nel creare una mentalità che consideri la manutenzione come un investimento e rendere ciò operativamente efficace ed utile alla vita dell'azienda. Trattandosi di un'attività che intacca fortemente la sicurezza dei lavoratori e dell'utenza, è resa necessaria anche un'opera di responsabilizzazione da parte delle squadre manutentive e della classe dirigente dell'azienda stessa. La manutenzione è definita come *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). Si evince fin da subito che l'attività manutentiva è condotta in ottica di mero vantaggio per il servizio o bene prodotto dall'azienda e non deve essere vista come spreco di risorse e tempi. Il progresso tecnologico, e l'impiego di materiale sempre più sofisticato, ha reso necessari una serie di interventi preventivi o correttivi del materiale, definendo progressivamente delle procedure di manutenzione redatte sia dalle case produttrici sia dalle aziende che usufruiscono di tali materiali. Per il suo origine la manutenzione non è stata inizialmente volta a processi di ottimizzazione dei tempi e dei costi, essendo legata alla messa in fuori uso del pezzo e demandata solo a posteriori dell'evento di guasto. Solo in tempi più recenti la pianificazione di una corretta manutenzione è entrata a far parte del processo di produzione aziendale. La letteratura considera l'attività manutentiva a volte parte del processo produttivo e a volte parte di un processo di progettazione in una posizione che si colloca durante il ciclo di produzione. Il ruolo che i capi squadra hanno acquisito con il tempo gli pone in costante rapporto con tutti i comparti aziendali, confrontandosi quotidianamente con le rispettive esigenze e cercando di creare una sinergia

unica per la risoluzione dei problemi. Si mettono in evidenza ora alcuni degli obiettivi principali che la manutenzione è chiamata a perseguire, non solo in campo ferroviario:

1. svolgere attività preventiva agli eventi di guasto, mantenendo la macchina efficiente e fornire continuo aggiornamento per incrementare la sicurezza,
2. pianificare gli interventi di adeguamento e modernizzazione, sia in termini temporali sia per l'aggiornamento tecnologico,
3. ricorrere a competenze esterne all'azienda, ove necessario, per la risoluzione di problemi di dimensioni importanti,
4. svolgere attività di revisione periodica garantendo un adeguato grado di funzionalità e miglioramento tecnico ed eventualmente stabilire la sostituzione della macchina,
5. svolgere attività di formazione del personale addetto, sia per la conoscenza delle macchine sia per la condivisione della responsabilità e dell'azione nei confronti di guasti,
6. effettuare una continua comunicazione con le altre parti aziendali, in modo da creare una collaborazione nella gestione della produzione e trovare una soluzione comune ai rispettivi problemi,
7. gestione del magazzino, al fine di non avere tempi di attesa posteriori ai guasti ma essere pronti nella riparazione e nella rimessa in opera della macchina,
8. fornire una dettagliata documentazione ed una precisa archiviazione dei processi attuati e della risoluzione dei problemi.

Il responsabile della manutenzione deve quindi:

- gestire le politiche manutentive,
- gestire le risorse umane in base alle esigenze,
- gestire la pianificazione degli ordini e dei ricambi disponibili, in accordo con l'economicità dell'azienda.

Per questi motivi, negli ultimi anni, il ruolo del responsabile della manutenzione sta assumendo peculiarità di carattere manageriale. La sua responsabilità, recentemente cresciuta in questa visione di insieme, prende campo in maniera attiva nella gestione finanziaria dell'azienda e negli investimenti di tempo e risorse del capitale umano (Tertan, 2017). È chiaro fin da subito come le attività legate alla manutenzione possono essere affinate sia in termini di efficacia sia in termini di efficienza. L'acquisto di nuovo materiale rotabile

comporta un'analisi, oltre delle caratteristiche tecniche e prestazionali, anche dei parametri RAM (affidabilità, disponibilità, manutenibilità). Questo ha costituito un elemento di novità sia per i costruttori sia per le imprese ferroviarie. Ad oggi, lo sforzo si concentra nella valutazione della RAM a priori, obbligando i costruttori a garantire una vita utile del prodotto venduto e stipulando con le imprese dei vincoli contrattuali. I parametri RAM sono passati in pochi anni da non essere presi in considerazione ad essere base di progetto fin dalla sua ideazione. L'impresa ferroviaria, per contro, dovrà recepire i piani manutentivi forniti dalle case costruttrici e impegnarsi nell'eseguire le procedure corrette nelle tempistiche indicate, al fine di garantire sempre uno stato ottimo del materiale rotabile e diminuire il "life cycle cost" (LCC) (Giannone, 2010).

4.1. Teoria della manutenzione

La teoria dell'affidabilità è stata concepita al fine di sviluppare metodi per stimare se un prodotto sarà in funzione per la durata richiesta dell'utilizzatore. Una macchina è concepita per soddisfare un compito preciso, nei tempi previsti durante la sua progettazione. La sua attività tuttavia non può essere continuativa durante gli anni a causa del deperimento a cui essa va incontro. Due sono i concetti che caratterizzano la vita della macchina:

- affidabilità: *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.* (Tertan, 2016)
- disponibilità: *la percentuale di tempo di buon funzionamento rispetto al tempo totale in cui è richiesto il funzionamento stesso dell'elemento* (macchina, sottosistema o componente). (Tertan, 2016)

Queste sono due grandezze fondamentali per comprendere le teorie della manutenzione e l'inevitabile deperimento e ripristino delle condizioni di funzionamento nella vita utile di una macchina. L'affidabilità non è una grandezza deterministica ma una probabilità che, come ogni variabile aleatoria, il suo valore può essere determinato solo attraverso considerazioni probabilistiche: esso quindi non fornisce la certezza che un guasto si verifichi o meno ma dà risultati di utilità grazie ai quali è possibile prendere decisioni sulla modalità di funzionamento di un impianto.

4.1.1. Impiego della Teoria dell'Affidabilità

I principali motivi che spingono un'impresa ad applicare le tecniche affidabilistiche sono:

- aumento della complessità delle macchine con conseguente aumento delle probabilità di guasto,
- esigenza di aumentare la durata di funzionamento di una macchina,
- difficoltà di manutenzione per le parti meno accessibili di una macchina,
- sicurezza.

In generale per qualsiasi prodotto o servizio, l'affidabilità coinvolge molti aspetti legati al possesso di un bene:

- costi di gestione: l'affidabilità coinvolge sia il costo di acquisto che quello di manutenzione: materiali più affidabili comportano un incremento del prezzo,

- soddisfazione del cliente: una cattiva affidabilità non corrisponde alle aspettative del cliente e porta disaffezione rispetto il prodotto,
- gestione delle risorse: un componente che si guasta raramente comporta una minore quantità di risorse necessarie per la sua gestione durante la sua vita utile,
- qualità: una bassa qualità può significare una bassa affidabilità.
- manutenibilità: definita come la probabilità che al tempo *t* dal guasto, il componente sia nuovamente funzionante.

Ogni azione di incremento o decremento di affidabilità e disponibilità comporta un costo, che può essere rappresentato come in Figura 51:

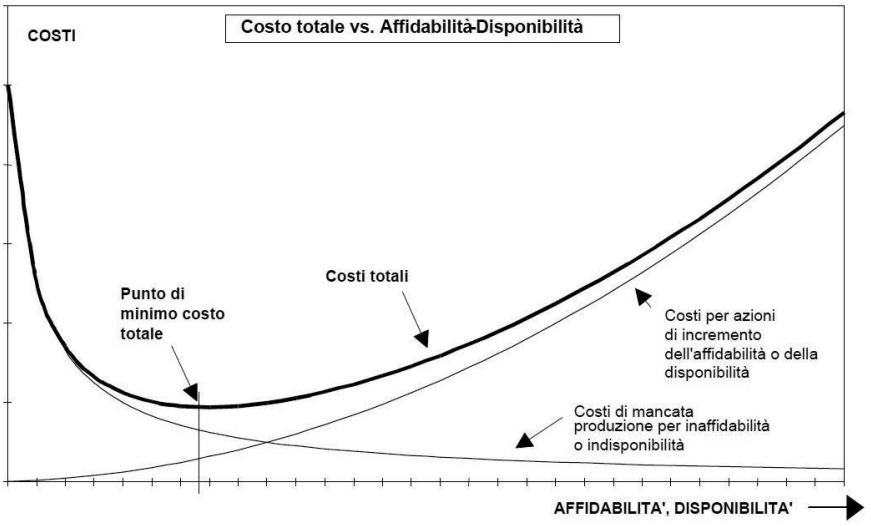


Figura 51- Costi legati all'affidabilità e alla disponibilità di una macchina (Fonte: Furlanetto et al., 2006)

Come si evince in termini qualitativi dal grafico, un mancato investimento in affidabilità e disponibilità comporta un costo monetario minore a fronte di un costo per mancata produzione maggiore, al contrario un impiego di risorse economiche al fine di migliorare i due parametri prestazionali si traduce in un investimento di tempo nel quale la macchina potrà produrre ciò per cui è stata progettata. In questo quadro si inserisce la manutenzione che collaborano al funzionamento del sistema ma comporta inevitabilmente un costo monetario non trascurabile nel bilancio aziendale (Furlanetto, 2006).

4.1.2. Affidabilità

Come già detto, l'affidabilità (in inglese Reliability) rappresenta la probabilità che un componente svolga il suo compito senza fermarsi per guasto in un certo tempo *t* una volta inserito in determinate condizioni ambientali. Questa definizione è valevole solo se viene assunto che:

- il componente ammette solo due stati: buon funzionamento o stato di danno,
- siano stabilite in modo chiaro le condizioni ambientali nel quale opera il componente,
- sia stabilito l'intervallo [*0* ; *t*] nel quale si garantisce l'operato del componente.

Su un generico campione di 100 unità, si ipotizzi che dopo un periodo *t* si siano guastati 10 pezzi: l'affidabilità risulta il 90% in un tempo *t*. Se dopo un periodo *2t* cessano di funzionare 15 pezzi allora l'affidabilità del sistema è 85% su un periodo *2t.* l'affidabilità può essere stimata come il completamento a cento della percentuale di guasti. Inserendo i dati in un grafico in maniera sistematica nel tempo si ottiene un andamento simile alla Figura 52:

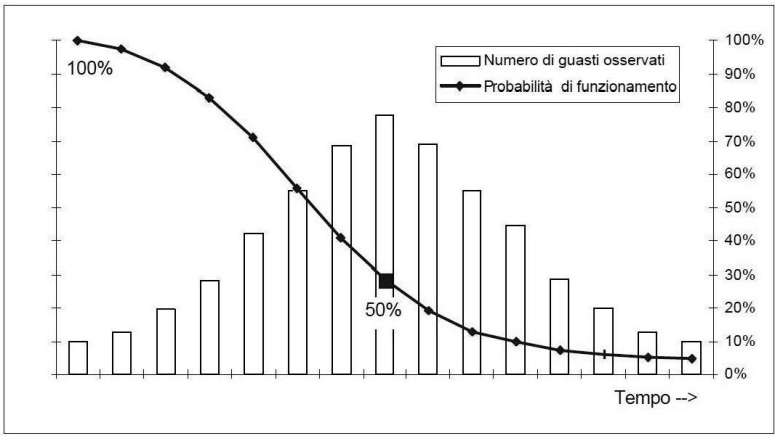


Figura 52 - Andamento qualitativo dell'affidabilità nel tempo (Fonte: Furlanetto et al.,2006)

Alcune caratteristiche importanti contenuti nella normativa UNI 9910 che descrivono l'affidabilità sono:

- il concetto di affidabilità è applicabile a qualsiasi oggetto costruito dall'uomo, sia esso un semplice componente o parte di un sistema;
- l'affidabilità di un sistema dipende dall'affidabilità dei singoli componenti e da come essi interagiscono fra loro. Per valutare l'affidabilità globale si applica quindi la regola di decomposizione gerarchica di un sistema in sotto-sistemi;
- l'affidabilità è una probabilità ed, in quanto tale, è un numero adimensionale compreso tra 0 e 1;
- per definire l'affidabilità è necessario stabilire esattamente le condizioni in cui l'oggetto si trova ad operare. I concetti di "condizione" e "durata" sono inglobati nel concetto di missione, concetto base nello studio dell'affidabilità.

L'andamento della legge rappresentata in figura è di tipo normale, anche se essa rappresenta la legge più frequente in ambito manutentivo esistono anche altre leggi (log-normale, esponenziale, Weibull, …). L'esempio è utile per stabilire che:

- maggiori sono gli elementi del campione e maggiore sarà la precisione nel definire la probabilità di funzionamento. La legge esatta si otterrebbe a campionamento infinito.
- si può definire un tempo medio al guasto, definito Mean Time Between Failure (MTBF), ovvero il tempo nel quale la metà del campione ha smesso di funzionare.

I livelli di affidabilità cambiano in funzione dell'effetto del mancato funzionamento dell'oggetto in questione. Applicando questo nel campo della manutenzione, aiuta a conoscere la probabilità di buon funzionamento in un periodo preciso di tempo e l'importanza di un intervento preventivo al guasto: la linea di confine tra i livelli di affidabilità richiesti dal componente sono dettati dall'importanza che esso riveste nel sistema e dalla sicurezza che il suo mancato funzionamento può avere come conseguenza. Riassumendo i presupposti per un'applicazione della teoria dell'affidabilità sono:

- descrizione oggettiva della condizione di guasto;
- durata minima necessaria *t* affinché il componente possa svolgere le sue mansioni,
- determinazione delle condizioni ambientali entro cui il componente è progettato per lavorare.

Affidabilità nel continuo

Si può estendere la definizione di affidabilità in termini discreti ΔT al continuo, considerando unità di tempo infinitesime *dt*. Considerando come variabile aleatoria *t* il tempo intercorso tra la condizione iniziale e l'istante di guasto, si può definire la probabilità di guasto $P\,(\,t\,;\,t+dt\,]$ come la probabilità che si guasti nell'intervallo $(\,t\,;\,t+dt\,]$. Nel caso continuo si definisce la probabilità di guasto come il prodotto di una funzione *f(t)*, denominata densità di probabilità, per l'intervallo di tempo preso come riferimento *dt* (Garetti, 2012).

$$P(t; t+dt] = f(t)dt \quad (5.1)$$

Definendo con la variabile *x* i generici istanti temporali nell'intervallo in considerazione, si può scrivere:

$$f(t)dt = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{P(x)}{\Delta t} \quad (5.2)$$

Conoscendo la densità di probabilità al guasto *f(t)*, attraverso l'integrazione nel tempo si può conoscere la funzione di distribuzione cumulata *F(t)* attraverso la semplice integrazione:

$$F(t) = \int_0^T f(t)dt \quad (5.3)$$

Graficamente l'integrale rappresenta l'area sottesa dalla curva *f(t)*. Avendo introdotto queste nozioni, si può interpretare l'affidabilità *R(t)* come il complemento a *1* della distribuzione cumulata *F(t)*:

$$R(t) = 1 - F(t) = 1 - \int_0^T f(t)dt \quad (5.4)$$

Le funzioni *f(t), F(t)* e *R(t)* possono essere rappresentate graficamente come in Figura 53:

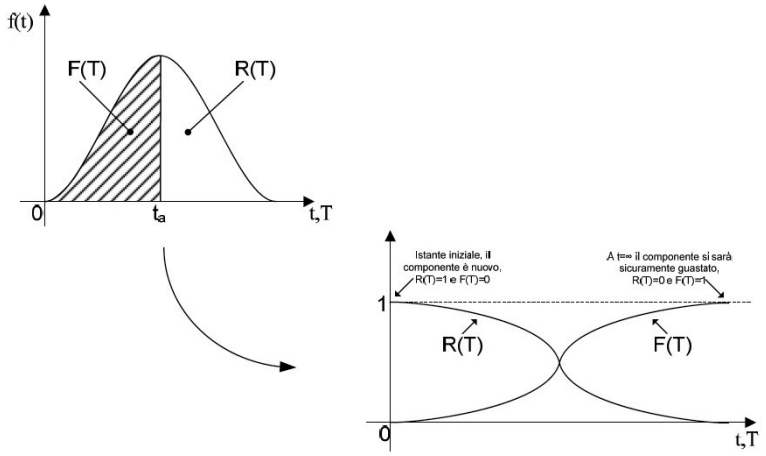


Figura 53 - Funzioni f(t), F(t), R(t) (Fonte: Furlanetto et al., 2006)

Disponibilità

In caso di dispositivi o macchine riparabili, ovvero quelli per cui è possibile ripristinare la funzionalità attraverso un'adeguata manutenzione, nella normativa UNI 9910 viene introdotta la definizione di una nuova funzione detta disponibilità *A(t)* (Availability): *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.* In termini matematici si definisce disponibilità:

$$A[\%] = \frac{tempo\ di\ disponibilità\ all'uso}{tempo\ di\ disponibilità\ all'uso + tempo\ di\ manutenzione} = \frac{MT}{TD + TM} \quad (5.5)$$

Dovendo perciò sostituire la definizione di MTTF con *Mean Time Between Failure* (*MTBF*) e *Mean Time To Repair* (*MTTR*). Perciò:

$$A[\%] = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad (5.6)$$

4.1.3. Il guasto e curva di mortalità

Nello studio delle attività manutentive il fenomeno oggetto degli studi statistici e probabilistici è il guasto (Furlanetto, 2006). Il guasto è l'evento che determina il passaggio da uno stato all'altro in cui l'oggetto perde le sue funzionalità determinando delle variazioni non accettabili per le prestazioni del sistema. Secondo la normativa ISO 10147 e UNI 9910 il guasto è individuabile quando *si verifica la cessazione dell'attitudine di un'entità a eseguire la funzione richiesta che ne caratterizza l'uso*. A seguito del guasto, il componente entra in stato di avaria. Il guasto avviene quando le sollecitazioni superano il livello di resistenza di un oggetto o perché l'oggetto è invecchiato e perciò ha abbassato la sua soglia di resistenza o perché si trova ad operare in condizioni non previste a quelle a cui era preposto. I guasti sono principalmente due:

- casuali: legati a sporadiche sollecitazioni non previste,
- legati all'invecchiamento: cioè al naturale degrado degli oggetti.

Una prima classificazione del guasto può essere in base alla sua entità:

1. guasto significativo o immobilizzante: è un guasto che genera un pericolo e/o impedisce il movimento o causa un ritardo superiore ad una certa soglia,
2. guasto maggiore: è un guasto che deve essere riparato al fine di far svolgere al sistema le funzioni per le quali è stato progettato.
3. guasto minore: è un guasto che consente comunque il raggiungimento delle prestazioni specificate.

Le cause del guasto sono da ricercare principalmente nei seguenti motivi:

- sollecitazioni, urti, fatica: sono funzione della distribuzione spaziale e temporale delle condizioni di carico e dalla risposta del materiale. Assumono un ruolo fondamentale le caratteristiche strutturali del componente e gli errori progettuali;

- temperatura: è una variabile operativa che influisce notevolmente sulle prestazioni del pezzo ed è funzione delle specifiche del materiale e della distribuzione spaziale e temporale della fonte di calore;
- usura: stato di degradazione fisica che si verifica in seguito a fenomeni di invecchiamento nella normale attività;
- corrosione: fenomeno strettamente collegato all'ambiente in cui il componente opera.

L'elemento che congiunge i due stati estremi di funzionamento e non funzionamento di un pezzo è il tasso di guasto $\lambda(t)$. Esso rappresenta la frequenza di guasto nella vita totale del pezzo. Nel caso di usura esso assume classicamente la curva a forma di "vasca da bagno" (Figura 54). Si può così dividere la vita utile del componente in tre parti:

1. un periodo iniziale definito "rodaggio" in cui i pezzi cominciano a svolgere la loro funzionalità. In questo periodo alcuni di essi vanno incontro a mortalità infantile e il tasso di guasto è generalmente molto elevato, tendente a ridursi progressivamente (zona 1)
2. un periodo intermedio denominato "vita utile" (zona 2) in cui il componente è ben assettato e può funzionare in pieno regime. Il tasso di guasto è minimo e pressoché costante.
3. Una fase finale di "usura" (zona 3) in cui l'utilizzo prolungato ha deperito il componente. In tale zona il tasso di guasto è crescente determinando sempre più guasti fino alla fine della vita utile dello stesso.

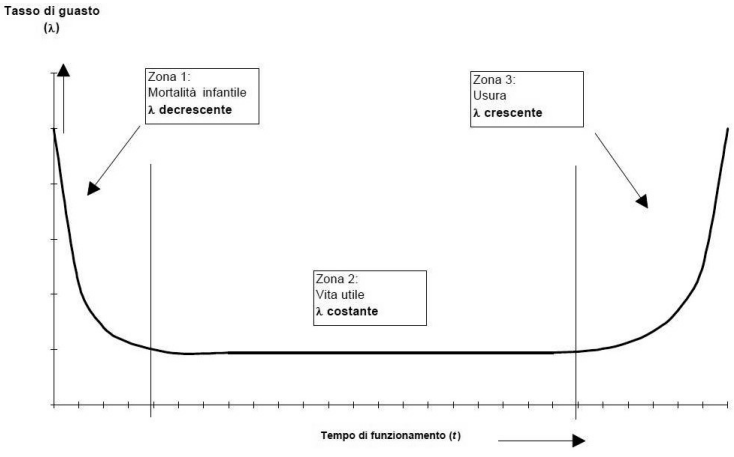


Figura 54 - Tasso di guasto (Fonte: Furlanetto, 2016)

Riguardo l'affidabilità, la zona 2 riveste grande importanza, e può essere espressa con legge esponenziale del tipo:

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (5.7)$$

Come si evince dal grafico (Figura 55), il Mean Time Between Failure in tal caso assume forma:

$$MTBF = \frac{1}{\lambda(t)} \quad (5.8)$$

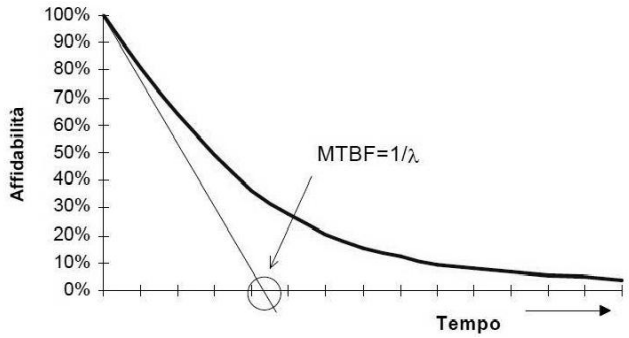


Figura 55 - Legge esponenziale negativa

Che può essere interpretato come un periodo medio tra due guasti costante nel tempo, avendo in tal modo la possibilità di stimare il periodo entro cui il componente si guasterà. Andando avanti nel tempo si trova la progressiva diminuzione del MTBF. La politica manutentiva volta a eseguire operazioni cadenzate ad intervalli di tempo pianificati, chiamati metodi preventivi, sono volti ad abbassare il tasso di guasto e quindi ad avere valori di MTBF sempre maggiori (Garetti, 2012).

Manutenibilità

Secondo la normativa UNI 9910 si definisce manutenibilità l' *attitudine di una entità* (macchina o impianto)*, in assegnate condizioni di utilizzo, a essere riportata in uno stato nel quale essa può svolgere nuovamente la funzione richiesta, con procedure e mezzi opportunamente specificati.* Dalla definizione si evince che:

- la manutenibilità è una caratteristica intrinseca e diversa per ogni componente,
- dipende dalle condizioni di utilizzo,

inoltre si può vedere come esiste una precisa relazione tra MTTR e la disponibilità, espressa in Figura 56:

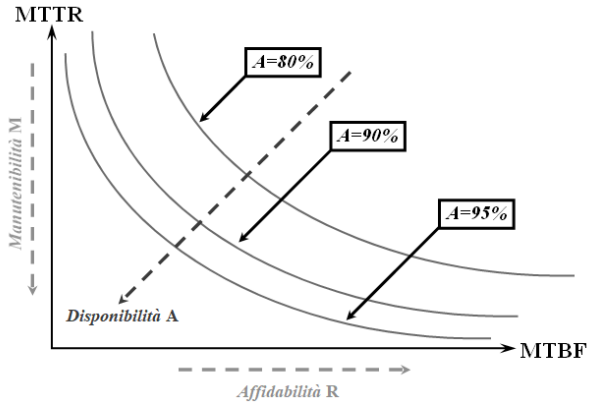


Figura 56 - Manutenibilità e Affidabilità (Fonte: Tertan, 2010)

4.1.4. Analisi affidabilistica di Weibul

I principali parametri affidabilistici sono:

- densità di probabilità di guasto *f(t)*: consideriamo un sistema bistabile, ovvero che può assumere due diversi stati possibili (funzionante e non funzionante). Prendendo come variabile il tempo, la probabilità di avere un guasto nell'intervallo tra t e $t+dt$ è $f(t)dt$. L'area totale sottesa da *f(t)* è uguale all'unità.
- distribuzione di probabilità di guasto: guastabilità *F(t)*. rappresenta la cumulata di probabilità del guasto, ovvero la probabilità che il componente sia in stato di guasto al tempo t.
- affidabilità (Reliability) *R(t)*: rappresenta la probabilità che al tempo t l'oggetto sia in buon funzionamento e coincide con la probabilità che l'elemento si guasti nell'intervallo da t a ∞.

$$R(t) = \int_t^{\infty} f(t)dt = \int_0^{\infty} f(t)dt - \int_0^{t} f(t)dt = 1 - F(t) \quad (5.9)$$

L'affidabilità quindi è il complemento ad 1 della guastabilità.

La teoria dell'affidabilità è accompagnata da ulteriori parametri, detti "di affidabilità", legati al tasso di guasto. Essi sono già stati definiti come Mean Time Between Failure (MTBF) e Mean Time To Repair (MTTR):

$$MTBF = \int_0^{\infty} R(t)dt \quad (5.10)$$

$$MTTR = \frac{1}{r}\sum_{i=1}^{r} t_{ri} \quad (5.11)$$

Dove r rappresenta la numerosità dell'insieme dei componenti guasti e t_{ri} il tempo di riparazione del componente i-esimo.

Le relazioni che esistono tra le funzioni $\lambda(t)$, $R(t)$, $F(t)$ e $f(t)$ permettono, conoscendo una di esse, di ricavare agevolmente le altre. Esistono molte leggi che descrivono la probabilità di guasto nel tempo e quindi l'affidabilità, in ambito manutentivo le principali leggi matematiche usate sono:

- Gaussiana:

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}\, e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (5.12)$$

- Esponenziale negativa:

$$f(t) = \ e^{-\lambda t} \quad (5.13)$$

- Weibull:

$$f(t) = \ e^{-\left(\frac{x}{\theta}\right)^{\beta}} \quad (5.14)$$

  La funzione di Weibull è descritta da due parametri positivi: θ e β. La sua duttilità, come già esposto, permette di descrivere l'affidabilità durante tutte le fasi di vita del componente. Il parametro θ rappresenta la resistenza temporale legata al componente [tempo], il parametro β è un parametro di forma ed è un numero puro (Furlanetto, 2006). Quest'ultimo varia da 0,5 a 5 e, al suo variare, la funzione assume diversi andamenti (Figura 57):

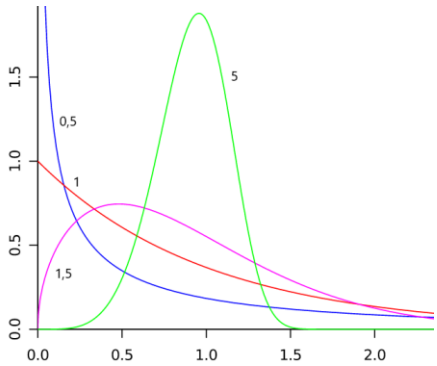


Figura 57 - Funzione di Weibull al variare di Beta

Si illustrerà nel *capitolo 5* l'applicazione della teoria dell'affidabilità appena esposta attraverso funzione di Weibull per il caso studio della manutenzione preventiva per la tornitura delle ruote ferroviarie per la Ferrovia Canavesana.

4.2.Strategie manutentive

4.2.1. Tipologie e tempi della manutenzione

La normativa UNI 9910 (EN13306) definisce un componente guasto quando *cessa l'attitudine a eseguire la funzione richiesta*. Possiamo dividere le strategie manutentive in due categorie: quelle volte a riparare guasti e quelle volte a prevenirne l'insorgenza. La prima prende il nome di *manutenzione correttiva* (UNI 9910), la seconda di *manutenzione preventiva* (UNI 9910). L'obiettivo di entrambe è la mitigazione e la minimizzazione della condizione fuori uso per usura dei componenti soggetti ad invecchiamento per fatica. Per avere una chiara e corretta pianificazione delle attività manutentive è necessario possedere una dettagliata documentazione storica dei processi e delle occorrenze di guasto, una disponibilità di magazzino sufficiente a far fronte alla maggior parte dei problemi, avere personale addestrato e competente nel funzionamento dei macchinari. La normativa definisce *guasto istantaneo* un evento improvviso e non prevedibile. Tale situazione si manifesta quando lo stress a cui è sottoposto il componente supera la sue resistenza, diminuita nel tempo a causa dell'usura. Tutti questi elementi sono descritti in maniera grafica nella forma "a vasca da bagno": inizialmente il personale non è addestrato all'uso delle macchine ed essa ha bisogno di un periodo di assestamento, questo concorre ad avere tassi di guasti elevati ma decrescenti nel tempo (zona 1). A seguire questa prima fase di rodaggio, il tasso di guasto si assesta ad un valore costante durante la vita utile del componente finché, per usura, comincia a mostrare cedimenti. La condizione di usura è funzione sia del tempo (ore di lavoro accumulate) sia del suo utilizzo (condizioni di lavoro). Le strategie manutentive sono volte a

far permanere il tasso di guasto più possibile nella zona di vita utile e costante nel tempo, affinché l'operatività della macchina risulti massima. Tipicamente tra il manifestarsi del guasto e le tempistiche di intervento di manutenzione trascorre un tempo, denominato *ritardo amministrativo*, dovuto al periodo legato allo studio del guasto, al reperimento delle risorse e al trasferimento alla squadra manutentiva del pezzo. La UNI 9910 riporta uno schema esemplificativo per comprendere i tempi tipici del fenomeno (Figura 59). Come si può notare dal grafico, sono individuabili diverse tempistiche:

- **Rallentamento**: la macchina continua la sua produzione ma in maniera rallentata. Il rallentamento è da intendersi sia fisico sia nel livello di qualità di produzione. È in questo intervallo di tempo che l'operatore o il fruitore della macchina deve segnalare il decadimento prestazionale all'officina competente, portando ad un'azione tempestiva della manutenzione.
- **Ritardo amministrativo**: come descritto in precedenza, è legato alle tempistiche di studio e conoscenza del problema da parte della squadra manutentive ed inoltre al tempo di reperimento dei componenti per effettuare le riparazioni. Inoltre sono legati ad esso anche tutte le tempistiche legate all'eventuale "coda" di manutenzione: non è assicurata la disponibilità immediata di squadre manutentive o postazioni libere per effettuare tutte le lavorazioni. È compito dell'impresa ridurre al minimo questo tempo per avere una politica manutentiva efficiente e capace di rispondere tempestivamente alle esigenze di produzione aziendale.
- **Tempo di manutenzione**: è possibile individuare quattro componenti:
    - *Tempo di ricerca e rilevazione dell'anomalia segnalata*: il tecnico effettua una valutazione più approfondita rispetto al tempo amministrativo tramite diagnostica diretta sulla macchina o tele diagnostica.
    - *Tempi di trasporto*: sia le risorse, arrivate e presenti in magazzino, sia i componenti hanno bisogno di essere spostati in adeguate aree dove andranno in lavorazione.
    - *Tempo di effettiva riparazione*.
    - *Tempo di controllo*: si effettuano delle verifiche di controllo prima della rimessa in opera del pezzo precedentemente guastato.

Il tempo di indisponibilità sarà dato dalla somma delle singole voci appena elencato.

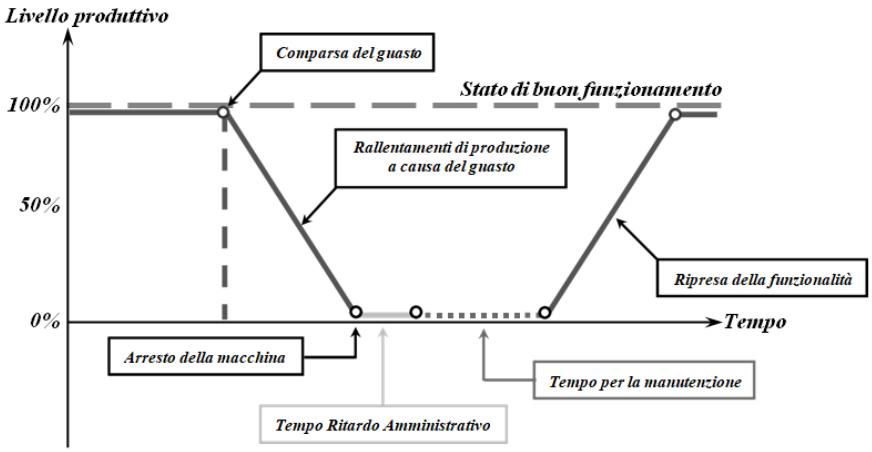


Figura 58 - Tempi della manutenzione (Fonte: UNI 9910)

4.2.2. Politiche e filosofie di manutenzione

Investendo un ruolo di sempre maggiore importanza, la manutenzione ha sviluppato in tempi recenti diverse politiche e filosofia manutentive riassunte nel seguente schema (Figura 59):

Figura 59 - Politiche e filosofie legate alla manutenzione (Fonte: Furlanetto et al., 2006)

La manutenzione correttiva

La normativa UNI 9910 (EN 13306) classifica come manutenzione correttiva quella *manutenzione eseguita a seguito di un'avaria e volta a riportare un'entità nello stato in cui essa possa eseguire la funzione richiesta.* Secondo Furlanetto et al. (2006) essa può essere interpretata come *esercizio fino a rottura*. A vantaggio di questa teoria vi è un costo

praticamente nullo durante l'intero stato di funzionamento della macchina, a svantaggio però vi sono le perdite di ricavi prolungate per un tempo relativamente lungo di fermo, la non pianificazione dell'intervento e il costo della riparazione generalmente elevato rispetto ad altre politiche. Questa gamma di interventi sono di tipo tradizionalista, rimangono valide in assenta di costi di fermo elevati e riparazioni veloci oppure quando il ciclo produttivo può essere esercitato da una seconda macchina. Questa politica riveste un ruolo importante quando i macchinari hanno un elevato valore tecnologico, la fornitura preventiva prima dell'insorgenza del guasto richiederebbe un onere economico notevole.

La manutenzione preventiva

La normativa UNI 9910 classifica come manutenzione preventiva quella *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). Questa politica quindi è basata sulla sostituzione di componenti ancora funzionali, in modo da diminuire la probabilità di cedimento non controllato e avere un minore fermo possibile. Si sono sviluppate principalmente tre tecniche:

- *programmazione statica*: i periodi temporali tra una sostituzione e l'altra sono fissi e decisi a priori in base ai limiti di usura. Essi sono determinati dalle condizioni di usura e dalle esigenze di sicurezza. Nell'ambito dei trasporti le politiche si sono maggiormente orientate verso tale scelta.
- *programmazione dinamica*: la storia dei guasti fornisce il cadenzamento temporale entro cui eseguire le attività di manutenzione. Si calibra il calendario attraverso le prime due misurazioni MTBF, per poi aggiornare continuamente a seconda della storia evolutiva dei guasti. Tale approccio risulta competitivo in termini economici e temporali. Lo svantaggio è legato a quei componenti di difficile previsione di decadimento e quando non vi sono dati storici attendibili, il rischio è la sostituzione di pezzi ancora funzionali e nel pieno della loro vita utile.
- *programmazione su condizione*: una politica valida e spesso usata è legata alla valutazione dello stato di usura del componente. La programmazione su condizione si basa su cicli di smontaggio e rimontaggio durante i quali si analizzano le condizioni del pezzo. Un elemento di criticità di tali interventi risulta il possibile aggravio delle condizioni dovuto a guasti indotti. Per tali motivi non si eseguono manutenzioni su condizione dell'intera macchina ma generalmente solo di singoli pezzi ed elementi di

criticità. Inoltre tale politica è correlata ad una adeguata formazione della squadra manutentiva.

La politica scelta và comunque individuata facendo un bilancio tra:

- spese di manutenzione: materiali, consumi, fermo macchina, personale, ecc.
- guadagno economico: ricostituzione dello stato della macchina.

La manutenzione predittiva

In riferimento all'individuazione di grandezze fisiche correlate ad un possibile guasto del componente. L'idea è riconducibile alla filosofia di non creare fermi improduttivi ma segnalare preventivamente la possibilità di insorgenza del guasto. Un tipico esempio è la correlazione tra l'aumento di temperatura di un cuscinetto e la vita utile ancora disponibile. Uno dei principali svantaggi di questa filosofia, oltre alla difficoltà di analisi e l'individuazione di tali grandezze, risiede nell'elevato costo legato a tecnologie volte al monitoraggio.

La manutenzione produttiva (TPM)

La filosofia si basa sulla visione d'insieme del ciclo produttivo aziendale. Se il personale addetto alla produzione fosse in grado di riconoscere e provvedere alla manutenzione della macchina si riuscirebbe a produrre un guadagno sia in termini temporali sia economici. Le problematiche legate alla sua applicazione sono chiare: coinvolgimento massiccio del personale, variazione nelle abitudini lavorative, ecc.

Il controllo e la politica decisionale di questi elementi sono di competenza della parte manageriale legata alla parte manutentiva dell'impresa. Avendo chiari gli obiettivi della produzione è possibile personalizzare la decisione aziendale. Seguire un iter preciso e pianificato della politica manutentiva e verificare le fasi eseguite ad ogni ciclo sono passaggi necessari al fine di incrementare la competenza del reparto manutentivo e fornire una soluzione sempre più tempestiva, economica ed efficace per l'intera impresa. Proprio tale elemento di novità negli ultimi anni, ha integrato la manutenzione nella vita quotidiana della produzione ed elevato gli addetti ad una posizione maggiormente manageriale, facendo assumere ai dirigenti di questi reparti decisioni con pesi rilevanti sulla vita e sul bilancio aziendale.

4.2.3. Cicli e trama manutentiva in ambito ferroviario

Riassumendo, esistono due filoni di pensiero antitetici per la manutenzione: prevedere e intervenire a posteriori, ovvero eseguire solo riparazioni, oppure stabilire un sistema di revisione cadenzate in modo da agire preventivamente. La scelta dipende sia da caratteri economici, sia dalla natura del componente interessato. Spesso nell'ambito ferroviario si adottano entrambi le soluzioni al fine di garantire livelli di sicurezza e prestazione medio - alti (prescritti da normativa ANSF). La manutenzione preventiva non elimina la possibilità dell'insorgenza di guasti accidentali. il tratto comune di qualsiasi politica risulta il miglioramento della prestazione offerta e la corretta gestione dei costi. A tal fine sono state proposte numerose politiche manutentive, in continua evoluzione, e la sistematizzazione di tali processi fin dall'inizio vita del materiale rotabile. Ogni impresa ferroviaria necessità di un centro di coordinamento per la gestione della manutenzione del materiale rotabile. Tale centro necessita di una comunicazione con la gestione dell'esercizio al fine di operare in perfetta simbiosi e garantire la migliore qualità del servizio. Il piano di manutenzione è redatto periodicamente e vi sono illustrate tutte le operazioni preventive per ciascun rotabile. Tale documento è composto di: trama manutentiva, fiche di riparazione, scheda di manutenzione (Giannone, 2010).

Trama manutentiva

Essa è definita per ciascun rotabile. Si divide il mezzo nelle unità fisiche soggetto delle manutenzioni. Per ognuna si riporta la cadenza degli interventi da eseguire. Viene indicato fin da subito il ciclo operativo degli interventi di manutenzione dove si riportano le percorrenze chilometriche da rispettare in scadenza e la tipologia di lavoro da eseguire (Figura 60). La documentazione della trama manutentiva è compilata dal costruttore, in continuo aggiornamento in base ai dati provenienti dall'esercizio delle imprese che utilizzano il loro materiale, e in accordo con la normativa di legge vigente, principalmente redatta da ANSF o Normativa Europea (EN). Nella trama manutentiva recepita dal Gruppo Torinese Trasporti, si suddividono gli interventi in:

S: Sicurezza (prescritte per la circolazione su rete RFI),

R: Regolarità di esercizio (finalizzate al mantenimento, nel tempo, dell'affidabilità e della disponibilità dei mezzi),

C: Comfort, decoro o altro (finalizzate al mantenimento, nel tempo, degli standard qualitativi del servizio).

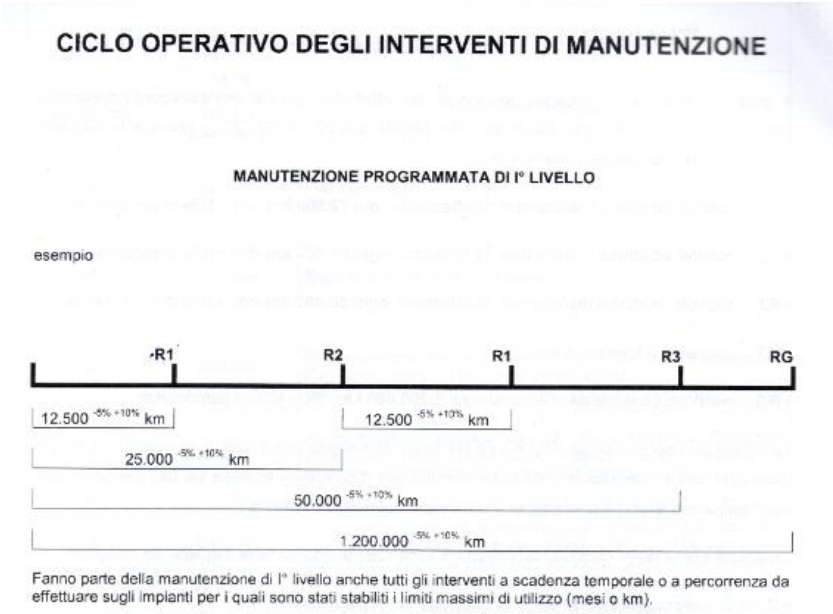


Figura 60 – Estratto trama manutentiva TTR Ale501-Le220-Ale502 (Fonte: Gruppo Torinese Trasporti, 2016)

Verrà illustrata più specificatamente il contenuto della trama manutentiva dei TRR oggetto di studio nel *paragrafo 4.3*. Viene illustrata inoltre nella trama manutentiva la suddivisione delle competenze dei manutentori:

ANT	Antincendio
CAR – ROD	Carrello / Rodiggio
ELE	Circuiti elettrici
PNE	Impianto pneumatico e freno
POR	Porte
STB	Sistema tecnologico di bordo
TEC	Telaio a cassa
TER	Trazione e repulsione

Tabella 16 – Ambiti di competenza della trama manutentiva

Fiche di riparazione

Associato ad ogni specifica fase della manutenzione, si fa riferimento ad una precisa fiche manutentiva per gli interventi descritti nella trama manutentiva. Sono contenuti nella Fiche tutti i riferimenti alle schede di manutenzione, una breve descrizione degli interventi, un riepilogo delle scadenze programmate e la relativa categoria dell'intervento (Figura 61).

A.01.08 CAR-ROD	**Sospensione primaria** Accertare visivamente l'integrità delle molle e degli arresti verticali.	■	■	■		S
A.01.08.01 CAR-ROD	Accertare le condizioni del tampone di arresto verticale, delle molle interne ed esterne e della boccola guida. Manuale GTT/EMU-MR1-02A-01 - scheda TC-021				km 300.000	S
A.01.09 CAR-ROD	**Sospensione secondaria** Accertare visivamente l'integrità delle "ciambelle" di gomma e l'assenza di tagli e/o abrasioni (sostituire se necessario). Manuale GTT/EMU-MR1-02A-01 - scheda TC-031	■	■	■		S
A.01.10 CAR-ROD	**Barra antirollio** Previo posizionamento del rotabile in fossa, accertare l'assenza di tagli, delaminazioni ed incrinature sia sui giunti elastici che sulle articolazioni in gomma/acciaio. Manuale GTT/EMU-MR1-02A-01 - scheda TC-006				km 150.000	S

Figura 61 - Estratto fiche manutentiva di 1° livello TTR Ale501-Le220-Ale502 (Fonte: Gruppo Torinese Trasporti, 2016)

Scheda di manutenzione

Tratta dal manuale di manutenzione, è riferita al singolo soggetto di cui si richiede l'intervento. Sono riportati i dati tecnici del componente, i disegni di progetto, le modalità di esecuzione della misurazioni e degli interventi. Sono inoltre descritti gli attrezzi necessari per operare, le tolleranze, i materiali usati per la costruzione, il riferimento normativo. Il personale addetto alla manutenzione deve essere formato ed avere ottima padronanza delle schede di manutenzione. (Figura 62). La stesura di tali documenti ha la struttura competente in ciascuna impresa e viene denominata UTMR (Unità Tecnologie Materiale Rotabile). La direzione dell'UTMR recepisce la Trama manutentiva dal costruttore, redige la Fiche insieme all'impianto che effettua la manutenzione stila, in copia uguale o leggermente aggiornata, le schede manutentive fornite dal costruttore (Giannone, 2010).

GTT S.p.A. DIVISIONE METROFERRO		n. REVISIONE 3

C-8) **Controllo delle sfaccettature del piano di rotolamento su ruote con cerchione riportato e su ruote monoblocco**

Le sfaccettature presenti sul piano di rotolamento originatesi dal pattinamento della ruota sulla rotaia possono assumere varie forme e dimensioni e, conseguentemente, ai fini della corretta interazione tra ruota e rotaia, è opportuno definire dei limiti dimensionali oltre i quali la loro presenza non è accettabile. Qualora l'esame visivo evidenzi il difetto, o di esso ne sia stata segnalata la presenza dal PdM, misurare con l'impiego di uno strumento idoneo la lunghezza e la profondità della sfaccettatura e confrontare i valori con quelli massimi ammissibili riportati nella tab.4.

DIAMETRO RUOTA [mm]	PROFONDITA' SFACCETTATURA [mm]	LUNGHEZZA SFACCETTATURA [mm]
< 800	0,5	40
801 - 900	0,5	42
901 - 1000	0,5	44
1001 - 1100	0,5	47

Tab.4

Figura 62 - Estratto scheda di manutenzione IT-001-GEN (Fonte: Gruppo Torinese Trasporti, 2010)

4.3. La manutenzione del materiale rotabile

Il materiale rotabile, al pari di tutte le macchine meccaniche usate dalle aziende per garantire la produzione o il servizio, ha bisogno di manutenzione. Il mantenimento in uno stato efficiente di esso è volto a evitare l'insorgenza di guasti, assicurare la regolarità dell'esercizio e la sicurezza del viaggio, garantire un livello adeguato di comfort per i passeggeri o salvaguardare l'integrità delle merci trasportate ed infine mantenere il materiale rotabile stesso per preservare la vita utile del mezzo. Nell'attività di manutenzione non sono da trascurare tutti gli aspetti legati al decoro e alla pulizia sia della fiancata esterna sia dei locali interni. Per tali aspetti è fondamentale per un'impresa ferroviaria avere un piano regolatore della manutenzione, opportunamente cadenzato, e prevedere dei giri macchina tali da osservare i giusti tempi per queste attività. Come si è descritto nei paragrafi precedenti, l'azienda può decidere di intervenire solo a posteriori, ovvero di eseguire interventi di riparazione a seguito di avarie, oppure di pianificare azioni preventive allo scopo di annullare le anomalie che possono compromettere l'erogazione del regolare servizio e la sua sicurezza. Avendo presente l'alto grado di sicurezza proprio dell'esercizio ferroviario, come descritto nel *paragrafo 2.1* e presente nelle direttive ANSF (*paragrafo 3.3.3*), le imprese ferroviarie sono state orientate verso la seconda scelta, non potendo comunque escludere l'insorgenza di guasti e quindi la possibilità di intervento a posteriori. L'usura del materiale rotabile dipende essenzialmente da due fattori: il tempo di esercizio e l'entità del lavoro svolto (Tertan, 2016). Tempo e fatica operano contemporaneamente nel deperimento del materiale rotabile: il primo è maggiormente legato al materiale stesso mentre il secondo aspetto si lega maggiormente al funzionamento delle parti meccaniche. In quest'ottica il distanziamento delle manutenzioni è stato concepito in base a criteri temporali o di esercizio svolto, ponendo anche una riflessione in termini economici e di disposizione di mezzi. Le aziende si dividono sulla scelta di prevalenza dell'uno rispetto all'altro, in base alle esigenze di esercizio e al tipo di linee servite: Trenitalia, data la sua operatività sull'intero territorio nazionale e grande movimentazione di mezzi, possiede un cadenzamento manutentivo basato sul tempo per quanto riguarda i veicoli trainati e sull'esercizio svolto per i mezzi di trazione; il Gruppo Torinese Trasporti che opera in spazi circoscritti e in cui il materiale rotabile compie un servizio "a navetta" tra due capolinea, basa l'intera attività manutentiva su base chilometrica, ovvero in funzione dell'esercizio svolto dalle macchine. Tutti i piani manutentivi devono essere conformi alle direttive delle aziende costruttrici e comunque devono essere revisionati ed approvati da personale certificato ANSF.

4.3.1. La manutenzione preventiva in campo ferroviario

Il materiale rotabile è composto da un'enorme quantità di pezzi che operano simultaneamente per assicurare il moto del veicolo. L'usura di essi tuttavia non è simultanea, ma differenziata nel tempo in base alle condizioni in cui essi operano in esercizio, inoltre tra i diversi organi sono accettate tolleranze differenti in termini di usura, determinando una scadenza diversa per i vari componenti. Oltretutto è necessario considerare che, per operare sul singolo pezzo, potrebbe essere necessario lo smontaggio di ulteriori pezzi, provocando un aggravio in termini temporali ed economici per eseguire la singola operazione di manutenzione. A tal proposito si cerca di racchiudere le manutenzioni delle parti collegate in un unico momento. In caso di guasti talvolta è necessario smontare e riparare componenti le quali sono state revisionate recentemente, procedendo quindi con lo smontaggio di altre parti che non necessitano revisioni e producendo come risultato uno scarso rendimento dell'officina e relativa spesa. Un altro aspetto da tenere in considerazione è il rapporto tra gli interventi di manutenzione e l'esercizio programmato: se si dovesse mettere fuori servizio un convoglio non appena raggiunge l'usura del componente, sarebbero necessari numerosi convogli di riserva per garantire il programma del servizio; raggruppando gli interventi tale numero diminuisce drasticamente. Per i motivi appena descritti si evidenzia la necessità di unire il più possibile gli interventi di manutenzione, avendo pianificato a priori un programma che faciliti l'organizzazione dell'esercizio e dell'officina di riparazione.

In ogni impresa ferroviaria la quantificazione del distanziamento temporale tra interventi manutentivi preventivi è affidata al reparto "Servizio Materiale e Trazione". Essi compilano i giri macchina in collaborazione con la "Direzione dell'Esercizio e Circolazione" trovando la soluzione ottimale alle problematiche di entrambi le parti, specie legate alle tempistiche e alla disponibilità del materiale rotabile. In questa valutazione è necessario prendere in considerazione:

- la durata tecnica (espressa in ore o chilometri di esercizio) di ciascun rotabile.
- l'accrescere sempre più rapido dell'usura e dei consumi del singolo componente, rendendo progressivamente alcuni difetti sempre più irreparabili e il conseguente deperimento degli organi ad esso connesso. In tal senso gli interventi di manutenzione risultano sempre più onerosi anche in termini economici.
- l'onere economico crescente, proporzionale con l'usura del componente.

- l'esigenza economica di ammortizzamento dell'intervento precedente, cercando di rendere conveniente il ciclo di manutenzione previsto.

Si delinea così un problema di minimo costo nel quale i parametri sono definiti sia dalle spese intrinseche della manutenzione ma anche dalle condizioni di esercizio del materiale rotabile. La via suggerita per la risoluzione di questo problema comprende due aspetti fondamentali (Tertan, 2016):

- la minimizzazione del singolo costo dell'operazione, qualsiasi essa sia;
- lo studio dell'opportuna distanza e alternanza tra il materiale rotabile che renda minimo il costo complessivo del giro macchine e quindi delle operazioni complessive sull'intera flotta a disposizione.

Va ricordato comunque che l'aspetto economico deve supportare le condizioni di esercizio richieste e che, per entrambi le parti coinvolte in queste decisioni, l'obiettivo unico è la massima efficienza e continuità del servizio erogato dall'impresa. Stabilita la situazione più favorevole per l'impresa, occorre attuare continue variazioni al fine di sopperire a tutti gli interventi imprevisti cercando di mantenere la coerenza con la strategia ottima adottata in fase di pianificazione e avendo presente dove agire al fine di minimizzare la perturbazione nella pianificazione globale del rapporto tra esercizio e manutenzione. L'occorrenza di guasti, di ritardi nelle lavorazioni e gli stessi limiti di modello, che si basano su studi probabilistici, sono i principali autori di queste variazioni. Lo studio dettagliato degli scenari, l'accrescimento di dati storici disponibili e la pratica quotidiana nella gestione delle risorse, sia in termini umani sia di macchine, permette di sopperire con celerità e competenza su questi sfasamenti. Va ricordato inoltre che, data l'importanza che riveste questo delicato rapporto tra le parti, la pianificazione deve sempre orientarsi a scelte cautelative e non eccessivamente rigide, devono essere individuati limiti di intervalli e tolleranze nelle scelte ponendosi inizialmente in condizioni più sicuri ed eventualmente variare a posteriori tali limiti verso condizioni più convenienti.

È evidente quindi che, grazie allo studio di modelli accompagnati dalla pratica quotidiana, è possibile stabilire la durata degli interventi nei quali il rotabile non è disponibile per l'esercizio, stabilire i mezzi necessari all'officina per soddisfare le esigenze lavorative, organizzare i turni di lavoro e il personale, provvedere al materiale necessario per svolgere le manutenzioni. Dalla pianificazione degli interventi di manutenzione preventiva, risulta

fondamentale comprendere la disponibilità di lavoro di ciascuna officina a disposizione, quali convogli dovranno essere assegnati alla riparazione e con quali tempistiche, concedendo alle singole unità di sopperire preventivamente alle varie esigenze. Ogni impresa stipula questi programmi su orizzonti temporali differenti: una buona organizzazione riesce a fare programmi annuali, organizzazioni meno accurate hanno limiti temporali semestrali o mensili.

4.3.2. Proposte di evoluzione nella manutenzione del materiale rotabile

Recentemente sono state proposte strategie più efficienti al fine di ridurre i tempi di inattività e i costi superflui. Questi metodi si basano principalmente sull'introduzione di sensori ed apparecchiature supportate da intelligenza artificiale collegate a sale di diagnostica in cui opera il personale addetto alla manutenzione del materiale rotabile. Già nella normativa UNI EN 13306 (Terminologia di manutenzione, 2010) in materia di manutenzione, si distingue nell'ambito della manutenzione preventiva la manutenzione programmata e la manutenzione su condizione[10]. Fino ad ora la manutenzione trattata si è basata sulla programmazione, l'elemento di novità consiste nel monitoraggio delle prestazioni e dei parametri di funzionamento del componente, controllando i provvedimenti da prendere conseguentemente. La manutenzione su condizione si basa sull'analisi dell'evoluzione dello stato effettivo del componente, monitorata tramite una serie di misurazioni, controlli visivi, prove non distruttive senza la necessità di smontare le parti del materiale rotabile. Tale metodologia non si avvale di metodi statistici, come quelli visti precedentemente, ma l'andamento dei parametri monitorati. Viene perciò abbandonata l'idea del cadenzamento manutentivo su base temporale e si introduce la possibilità di basare la manutenzione sulla reale condizione di salute della macchina. Questa filosofia di manutenzione non ha indubbi vantaggi sugli aspetti economici e di esercizio, ma riveste un ruolo chiave anche nella progettazione del materiale rotabile poiché il mezzo deve essere dotato di una serie di strumenti atti a garantire il monitoraggio dell'usura nel tempo. Al contempo si intuisce come tali sistemi richiedano il monitoraggio di ogni singolo componente, rendendo indispensabile il monitoraggio di tutte la parti che compongono il materiale rotabile (Corfiati et al., 2011).

Come già visto nel *paragrafo 4.2.1*, il fermo di una macchina avviene progressivamente nel tempo e a seguito del momento in cui si identifica il guasto potenziale. Nella pratica quotidiana sono molteplici i modi in cui si può identificare un guasto potenziale, l'intervallo

[10] (Trad.) *On condition*: da "condizionale", indica una scelta oggettiva supportata dalla decisione di un operatore introdotta nel sistema e non discrezionale.

tra questo punto e il momento di fermo per guasto rappresenta il range di azione della manutenzione predittiva. Una manutenzione CBM (Condition Based Maintenance) si delinea in tre fasi:

1. Acquisizione dei dati;
2. Elaborazione dei dati;
3. Fase decisionale e delineazione delle politiche di manutenzione.

L'introduzione di tali strategie permettono di effettuare gli interventi solo quando è necessario, creando un sistema più efficiente sia in termini economici sia logistici. Un'altra implicazione è la possibilità di variare il carico di lavoro in base allo stato della macchina, permettendo di allungare la vita utile del sistema. Tuttavia tale tecnologia, applicata in campo ferroviario, si adatta male alle diverse condizioni in cui il materiale rotabile è costretto a funzionare (specialmente condizioni climatiche ed ambientali). Data la non stazionarietà del materiale, dalla costruzione all'esercizio, i dispositivi di monitoraggio necessitano di un collegamento wireless con un centro manutentivo, complicando ulteriormente l'applicazione di tale tecnologia. Una volta implementato il sistema è in grado di fornire informazioni su:

- la tipologia di componente nel quale si registrano guasti,
- i sintomi del mal funzionamento,
- il tempo previsto che decorre fino al fermo macchina,
- le implicazioni del guasto sull'intero sistema,
- le azioni di manutenzione da adottare.

Attualmente la tele diagnostica nel campo ferroviario non è ancora stata raggiunta, dovendo sopperire ancora a numerosi problemi. Un investimento in questa direzione può portare ad un sistema sempre più efficiente e migliorare la concorrenza con altri sistemi di trasporto (Corfiati et al., 2011).

4.3.3. La manutenzione del materiale rotabile sulla Ferrovia Canavesana

Il centro di manutenzione è sito presso il capolinea di Rivarolo Canavese, nella parte nord-occidentale della linea e anche sede della Direzione di Esercizio e Circolazione. Attualmente su base mensile i due reparti si incontrano in una riunione e, conoscendo la percorrenza media settimanale di ogni convoglio, avendo precedentemente stabilito il distanziamento tra due interventi di manutenzione, stabiliscono i mezzi che matureranno la percorrenza stabilita. Sottraendo dal numero totale questi convogli e i convogli già presenti in manutenzione non

concluse, si ottengono i mezzi disponibili per l'esercizio divisi a loro volta tra macchine viaggianti e riserve. Si determinano così il fabbisogno di mano d'opera in officina, di manovratori tra la linea e i binari di manutenzione o ricovero e le scadenze da rispettare nelle riparazioni. Ne deriva inoltre il monte ore complessivo di lavoro di officina, si individuano i "colli di bottiglia" nell'intero processo, vengono evidenziate le principali problematiche e carenze sia lato pianificazione sia in termini di risorse. Si stabiliscono inoltre il monte ore di inutilizzo per ogni convoglio, uno dei principali parametri che verrà utilizzato nella parte simulativa (*capitolo 6*). Mediante un opportuno sistema di coordinamento la parte dirigenziale dell'officina può stabilire il carico lavorativo delle attività di manutenzione: inizialmente esaurendo le risorse a disposizione in officina e successivamente prendendo la decisione di appoggiarsi a ditte esterne quali le Officine Grandi Riparazioni e le Squadre Rialzo di Trenitalia o altre industrie private. È necessario non saturare completamente le risorse di officina, lasciando sempre spazio per le situazioni impreviste derivanti dall'esercizio. Come già accennato, avendo una naturale divergenza tra la situazione pianificata e la realtà, è prevista nella sede centrale di GTT un'azione di monitoraggio della situazione con conseguente continuo cambio di programmazione.

Per i convogli in esame (Ale501-Le220-Ale502) la trama manutentiva approvata da ANSF nel 2016 (protocollo 008448/2015) prevede le seguenti periodicità manutentive, e relativi multipli:

- **R1** controlli ed attività manutentive da effettuarsi ogni 12500 km (-5% / +10%) di percorrenza,
- **R2** controlli ed attività manutentive da effettuarsi ogni 25000 km (-5% / +10%) di percorrenza,
- **R3** controlli ed attività manutentive da effettuarsi ogni 50000 km (-5% / +10%) di percorrenza,
- **RG** revisione generale da effettuarsi ogni 1200000 km (-5% / +10%) di percorrenza da effettuarsi presso centri specialistici (Vado Ligure per questo convoglio),
- **MT** scadenze eccezionali a tempo o chilometri.

Le attività con periodicità R1, R2, R3 e MT fanno riferimento ai manuali redatti dalla ditta costruttrice (Alstom) ed alle normative e disposizioni emesse sia dell'esercente che dagli Enti aventi titolo ad operare nell'ambito della sicurezza ferroviaria quali ANSF. Sono presenti in

questo documento tutte le particolarità descritte nel *paragrafo 4.2.3*. Il documento si compone della descrizione dei lavori nei seguenti ambiti, rimandando ai singoli manuali di manutenzione per la descrizione tecnica delle attività:

OP		Operazioni preliminari
OF		Collaudo e prove finali
A	01	Carrello motore
A	02	Carrello portante
C	01	Impianti cassa e struttura
C	02	Sottocassa
C	03	Imperiale
C	04	Cabina di guida
C	05	Interno comparto
C	06	Esterno cassa
C	07	Toilette
E	01	Pantografo
E	02	Apparecchiature A.T.
E	03	Trazione
E	04	Ausiliari e relativi circuiti
E	05	Circuiti ed apparecchiatura B.T.
E	06	Videosorveglianza, pannelli indicatori, impianto di sonorizzazione
E	07	Impianto di climatizzazione cabina di guida
E	08	Impianto climatizzazione comparto passeggeri
E	09	Sistema tecnologico di bordo (STB)
E	10	Integrazione apparati STB
E	11	Antipattinaggio – antislittante
E	12	Sistema informatico di bordo
E	13	Collegamenti messi a terra
P	01	Gruppo primo alzamento pantografo
P	02	Impianto pneumatico e freno
P	03	Gruppo sospensione automatica
D	01	Dispositivi antincendio

Tabella 17 – Tipologia di lavorazioni nell'attività manutentiva (Fonte: Gruppo Torinese Trasporti, 2016)

Ognuna di queste sezioni è suddivisa negli interventi specifici ai singoli componenti, a loro volta accompagnati da una breve descrizione e ai riferimenti ai manuali specifici di

manutenzione. Inoltre si riportano a lato i riferimenti del cadenzamento pianificato per le singole attività e la categoria.

L'azienda ha pianificato anche le tempistiche per ogni operazioni di manutenzione, in base alle risorse disponibili (Tabella 18):

Tipo	*Periodicità*	*Durata massima [gg lavorativi]*	*Impiego stimato [ore]*	*Composizione squadra [addetti]*
R1	12500 km	1	48	6
R2	25000 km	1	64	8
R3	50000 km	2	80	5

Tabella 18 - Attività di manutenzione programmata (Fonte: Gruppo Torinese Trasporti, 2016)

Si farà ora cenno all'attuale politica di manutenzione in ambito di ruote ferroviarie. Tale aspetto riveste un ruolo di notevole interesse in quanto esse risultano il componente maggiormente dipendente dall'esercizio poiché la loro usura è funzione dell'infrastruttura (dal tracciato ferroviario che caratterizza le resistenze al moto), dal comportamento di guida dei macchinisti (in particolare dal sistema frenante e da come esso è utilizzato in marcia) e infine dal tempo di vita, come per gli altri componenti. Per queste ragioni è impossibile da parte del costruttore fornire indicazioni precise sulle tempistiche di tornitura delle ruote, fornendo nella trama manutentiva un valore massimo di riprofilatura delle ruote valido sull'intero territorio nazionale (direttiva ANSF) pari a 300000 km, raccomandando tuttavia la revisione delle ruote ad ogni ingresso del convoglio in officina. Questo vuoto di informazioni è gestito in maniera diversa dalle imprese ferroviarie, costringendo comunque ad una bassa tempestività nella programmazione della tornitura, operazione onerosa in termini di tempo e risorse utilizzate. Nell'ottica di ottimizzare la pianificazione del processo manutentivo dei materiali rotabili, tale vuoto deve essere colmato: la via "on condition" proposta nel *paragrafo 4.3.2* potrebbe essere una soluzione ma, in assenza di queste tecnologie, si proporrà in seguito un metodo statistico basato sugli elementi visti in questo capitolo. Attualmente sulla ferrovia Canavesana la manutenzione delle ruote si compone di un'analisi tramite tecnologia CALIPRI® (Figura 64) che permette di ottenere il profilo della ruota da confrontare con le tolleranze prescritte nella Procedura Operativa IT-001-GEN[11]. La tecnologia CALIPRI® è una strumentazione laser che misura il profilo senza contatto e visualizza i valori delle principali grandezze impostate su un supporto informatico. L'operatore, posto nel vano antistante i binari di manutenzione,

[11] Documento interno Gruppo Torinese Trasporti costituente la scheda di manutenzione per il controllo delle sale montate. Verrà illustrato il contenuto in dettaglio nel *paragrafo 4.4*.

scansiona la ruota con il laser e in tempo reale l'elaboratore processa i dati e fornire risultati grafici e tabellari all'officina (Figura 63, Figura 64, Figura 65).

Figura 63 - Operazione di misura del profilo delle ruote con strumentazione CALIPRI®

(Fonte: https://www.nextsense-worldwide.com/en/)

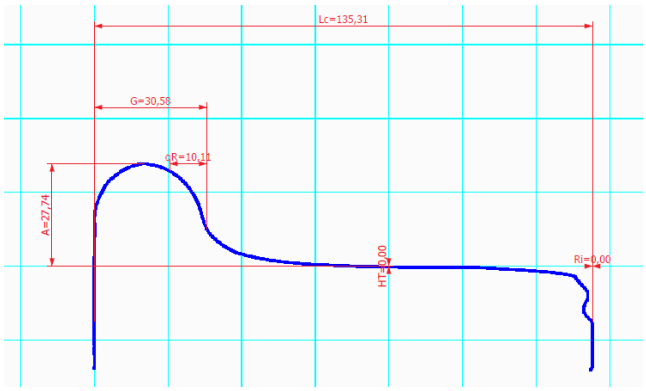


Figura 64 – Risultato grafico della misurazione effettuata tramite tecnologia CALIPRI®

(Fonte: Gruppo Torinese Trasporti)

		Dimensioni ordinate secondo gli oggetti					
		Wheelprofile					
		A	G	HT	Lc	qR	Ri
Asse1	Boccola1	27,98 mm	30,99 mm	0,00 mm	135,05 mm	9,86 mm	0,00 mm
	Boccola2	27,74 mm	30,58 mm	0,00 mm	135,31 mm	10,11 mm	0,00 mm
Asse2	Boccola3	27,94 mm	32,57 mm	0,00 mm	135,09 mm	10,41 mm	0,00 mm
	Boccola4	27,78 mm	31,23 mm	0,00 mm	135,52 mm	9,64 mm	0,00 mm
Asse3	Boccola5	27,86 mm	32,30 mm	0,00 mm	135,31 mm	9,81 mm	0,33 mm
	Boccola6	27,61 mm	31,92 mm	0,00 mm	135,22 mm	9,51 mm	0,18 mm
Asse4	Boccola7	27,59 mm	31,76 mm	0,00 mm	135,04 mm	9,53 mm	0,05 mm
	Boccola8	27,70 mm	31,50 mm	0,00 mm	135,12 mm	9,13 mm	0,09 mm
Asse5	Boccola9	27,70 mm	31,53 mm	0,00 mm	135,09 mm	9,65 mm	0,00 mm
	Boccola10	27,66 mm	31,92 mm	0,00 mm	135,16 mm	9,74 mm	0,11 mm
Asse6	Boccola11	27,66 mm	31,71 mm	0,00 mm	134,98 mm	9,60 mm	0,13 mm
	Boccola12	27,65 mm	31,76 mm	0,00 mm	135,05 mm	8,19 mm	0,08 mm
Asse7	Boccola13	27,81 mm	30,30 mm	0,00 mm	135,24 mm	9,80 mm	0,00 mm
	Boccola14l	27,79 mm	30,99 mm	0,00 mm	135,52 mm	10,47 mm	0,00 mm
Asse8	Boccola15	28,10 mm	30,85 mm	0,00 mm	135,48 mm	10,12 mm	0,00 mm
	Boccola16	27,53 mm	31,53 mm	0,00 mm	135,28 mm	9,58 mm	0,00 mm

Figura 65 - Risultati tabellari della misurazione effettuata tramite tecnologia CALIPRI®

(Fonte: Gruppo Torinese Trasporti)

Tale sistema permette all'officina una pianificazione a breve termine (qualche mese) della riprofilatura delle ruote, costringendo all'interpretazione soggettiva dell'evoluzione del fenomeno da parte degli operatori e necessita di un'alta specializzazione ed esperienza degli addetti dell'officina. L'attuale processo decisionale è svolto sulle singole ruote e differenzia la tornitura per ogni assile, al fine di non caricare l'officina di una manutenzione non programmata di una durata massima di 8 giorni lavorativi. Si evince come questo rappresenti un problema nella gestione del processo e una perdita non solo in termini di efficienza ma anche economici in quanto, dato le risorse limitate e la scarsa prevedibilità, l'azienda si avvale di servizi erogati da ditte esterni con costi maggiori. Si proverà successivamente a fornire una proposta a tale problematica.

4.4. La manutenzione delle ruote ferroviarie

Le verifiche da effettuare sulle sale montate sono di tipo sia visivo che strumentale e devono essere obbligatoriamente fatte nel rispetto dei tempi e delle modalità indicate nei piani di manutenzione dei vari rotabili. Tutti i controlli, indipendentemente dalla frequenza prevista nel piano di manutenzione, dovranno sempre essere eseguiti quando i carrelli hanno subito urti anomali. Le ispezioni visive devono essere svolte ogniqualvolta il materiale rotabile è disponibile per tale ispezione. Tutte le volte che, durante queste ispezioni, dovessero riscontrarsi anomalie sui cerchioni, sui bordini, nei centri ruota o sulle superfici di rotolamento, si dovrà obbligatoriamente procedere con le opportune verifiche strumentali (quali la misurazione con CALIPRI®, descritta nel *paragrafo 4.3.3*) al fine di accertare l'entità di quanto riscontrato. La misurazione con strumentazione laser è comunque accompagnata da misurazioni con calibri omologati FS (n° 65105) e profilometri.

Bordino

Le grandezze rappresentative delle condizioni del bordino e di cui occorre rilevare le quote sono (Figura 64):

- quota *A*: altezza bordino,
- quota *G*: grossezza bordino,
- quota Q_R: quota rappresentativa del corretto profilo del bordino sulla sua faccia attiva.

I valori da ritenersi accettabili sono (Tabella 19):

Misurazione	*A nuovo*	*Max usura*
Quota A	28 mm	36 mm
Quota G	32,5/33 mm	25,5 mm
Quota Q_R	> 6,5 mm	

Tabella 19 - Dimensioni accettabili del bordino (Fonte: Gruppo Torinese Trasporti)

Quando anche solo una delle precedenti quote non rientra nei limiti indicati, bisogna intervenire con apposita attrezzatura al fine di ridurre i valori prescritti. Ciò dovrà essere fatto anche quando i valori sono compresi nei limiti esposti ma si riscontra la presenza di spigoli vivi sulla faccia attiva del bordino. Qualora l'intervento non fosse sufficiente a ripristinare i valori accettabili, si procede con una seconda riprofilatura o la sostituzione della sala.

Spessore di rotolamento

Un'ulteriore verifica è da effettuare sullo spessore di rotolamento S_c su ruote con cerchione riportato. Il valore della quota è accettabile se non è inferiore a 35 mm. Quando lo spessore è inferiore a tale limite si procede con la sostituzione della sala.

Larghezza del cerchione

Successivamente si procede al controllo della larghezza del cerchione (L_C in Figura 65): indicando con L_{CN} la larghezza del cerchione "a ruota nuova" e con ΔL la differenza $(L_C - L_{CN})$, la larghezza misurata è accettabile se è soddisfatta la relazione $\Delta L < 5\ mm$. Per i TTR Ale501-Le220-Ale502 la misura di L_{CN} vale 135 mm. Quando il valore di ΔL è superiore al limite occorre riprofilare la ruota o sostituire la sala.

Scartamento interno e parallelismo delle facce

Quando la sala è in opera si esegue la rilevazione dello scartamento interno con un'unica misura a livello del binario. Lo scartamento interno è accettabile quando la quota misurata è 1360 mm (+3/-1) e il parallelismo è accettato se la differenza tra due quote misurate non è superiore a 2 mm.

Integrità della ruota

Da effettuare tramite controlli non distruttivi sul centro della ruota e sull'assile. I controlli non distruttivi sono di tipo visivo e acustico, il secondo effettuato tramite ascolto della percussione di un martello battente.

Sfaccettature sul piano di rotolamento

Le sfaccettature presenti sul piano di rotolamento originatosi dal pattinamento (*paragrafo 1.1.1*) della ruota sulla rotaia, può assumere varie forme e dimensioni. È opportuno definire i limiti dimensionali al fine del corretto contatto ruota-rotaia. Qualora l'esame visivo evidenzi difetti, bisogna misurare la lunghezza e la profondità della sfaccettatura e confrontare con i seguenti intervalli:

Profondità sfaccettatura 0,5 mm

Lunghezza sfaccettatura 44 mm

Il piano di rotolamento può essere soggetto da ulteriori difetti, di cui si riportano le tolleranze (Tabella 20):

Difetto	*Altezza o profondità [mm]*	*Lunghezza [mm]*
Riporto di metallo	1	60
Scorrimento del metallo	1	60
Cavità	1,5	30
Sfogliature	1,5	30

Tabella 20 - Difetti del piano di rotolamento (Fonte: Gruppo Torinese Trasporti)

Consolidamento cerchioni

Tale intervento richiede che la ruota sia stata precedentemente effettuate tali operazioni:

- Tracciate 4 linee bianche radialmente a circa 90° l'una dall'altra, ciascuna comprendente parte del centro della ruota e parte del cerchione,
- Eseguite, tramite punzone arrotondato, una o più coppie di tacche di riferimento, una sul cerchione e l'altra sul centro della ruota.

L'eventuale scorrimento del cerchione sul centro della ruota sarà evidenziato dallo spostamento dei riferimenti descritti sopra.

PARTE II: Calcolo dei tempi ottimali di riprofilatura delle ruote. Analisi dell'interfaccia Esercizio - Manutenzione tramite simulazione ad eventi discreti.

5. Ottimizzazione degli interventi di manutenzione preventiva. Caso studio: la riprofilatura delle ruote sulla Ferrovia Canavesana

Il presente capitolo è stato suddiviso in due parti: nel *paragrafo 5.1* viene esposta la metodologia presente in letteratura e adottata per condurre l'analisi del caso studio. Viene descritto in modo puntuale il metodo e i passaggi, giustificando alcune scelte a carattere teorico - matematico e vengono esposte le principali relazioni tra le grandezze caratteristiche del modello. Nel *paragrafo 5.2* si applica il metodo al caso studio delle ruote ferroviarie sulla Linea Canavesana, cercando di trovare una soluzione nella pianificazione di interventi di riprofilatura preventivi al fine di minimizzare i costi. Con questa analisi si vuole verificare l'effettiva consistenza e fattibilità dei risultati trovati da un modello matematico, andando ad analizzare le risorse disponibili in officina e proporre eventuali modifiche nel giro macchine e conseguente manutenzione del materiale rotabile. Successivamente si inserirà in questa analisi anche lo studio di eventuali imprevisti o ritardi, che comportano inevitabilmente modifiche al piano manutentivo programmato e valutazione degli effetti che ne comporta (*capitolo 6*). L'analisi condotta in questo modo è ritenuta completa in quanto, partendo da considerazioni puramente teoriche, viene a delinearsi ad ogni passaggio la condizione reale e l'effettiva esigenza dell'impresa. Viene fornito un preciso significato ad ogni grandezza e viene illustrato il rispettivo riscontro nell'esercizio e nella manutenzione oggi in atto in azienda. Il fine di tale impostazione perciò è non discostare mai la realtà dal metodo, ma creare un compendio tra le due valutando in maniera critica le ripercussioni dei risultati sulle decisioni concrete che deve compiere l'impresa ferroviaria. Il metodo, qui applicato al caso studio della riprofilatura delle ruote sulla tratta in esame, è applicabile a qualsiasi componente del materiale rotabile non soggetto a manutenzione preventiva, avendo a disposizione dati storici e stime sui costi di intervento. Si fornisce così un modello capace di fornire risposte concrete sui tempi ottimale di manutenzione preventiva e si dimostra qui la sua efficacia attraverso il caso studio analizzato.

5.1. Ottimizzazione dei tempi di manutenzione preventiva

5.1.1. L'analisi di Weibull

Lo scopo di questo paragrafo è la descrizione più dettagliata della funzione di affidabilità più idonea e già consolidata in letteratura. In generale la valutazione del tempo ottimale per la manutenzione preventiva può partire da due strade diverse:

1. l'utilizzo di funzioni empiriche: l'affidabilità è stimata a partire dal "fitting" dei dati storici presenti nello svolgimento dell'esercizio e della manutenzione dell'impresa ferroviaria. Si valutano i valori di *R(t)* per ciascun intervallo in cui si suddivide il calendario di esercizio del treno, successivamente tramite regressione polinomiale o minimi quadrati si ottiene la legge di affidabilità. Questa strada è percorribile esclusivamente se vi sono dati sufficienti per eseguire l'analisi a posteriori.
2. l'utilizzo di funzioni analitiche: si procede attraverso questa strada se è possibile avere a disposizione un campionamento statistico ed è previsto un aggiornamento dei dati nel tempo. Definita la legge, si calibrano i parametri attraverso la distribuzione di guasti a disposizione e si ricerca l'andamento che meglio approssima il reale.

Nel presente elaborato si farà ricorso al secondo approccio in quanto i dati forniti dall'impresa ferroviaria non sono abbondanti dato i pochi anni di esercizio dei treni Ale501-Le220-Ale502 sulla Linea Canavesana.

L'analisi di Weibull appare quella maggiormente usata nell'ambito ferroviario e, in generale, nell'ambito manutentivo. Questa scelta è giustificata sia dal fatto che la teoria di Weibull può rappresentare la vita dei componenti semplicemente variando i suoi due parametri fondamentali:

- θ: parametro di scala;
- β: parametro di forma o parametro di usura;

ed inoltre l'analisi può essere sfruttata in tutte le fasi di vita del componente, mentre altre tipi di legge sono caratteristici solo di alcuni stadi (curva "a vasca da bagno"). La relazione che lega l'affidabilità *R* al tempo di utilizzo *t*, secondo Weibull, è:

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\theta}\right)^{\beta}} \quad (5.1)$$

In questo caso, di valenza del tutto generale, i parametri caratteristici sono tre, aggiungendo ai due già presentati:

- γ: parametro di origine;

tale equazione può essere riportata all'equazione di una retta tramite l'applicazione di un doppio logaritmo alla stessa. Tale passaggio risulta di notevole utilità quando verranno ricercati i parametri della funzione in fase di calibrazione. Avendo già esposto che:

$$F(t) = 1 - R(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\theta}\right)^{\beta}} \quad (5.2)$$

Con semplici passaggi matematici si trova che:

$$\frac{1}{1-F(t)} = e^{\left(\frac{t-\gamma}{\theta}\right)^{\beta}} \quad (5.3)$$

ed applicando in successione il doppio logaritmo:

$$\ln\left(\frac{1}{1-F(t)}\right) = \left(\frac{t-\gamma}{\theta}\right)^{\beta} \quad (5.4)$$

$$\ln\left(ln\left(\frac{1}{1}-F(t)\right)\right) = \beta * \ln(t-\gamma) - \beta * \ln(\theta) \quad (5.5)$$

eseguendo le sostituzioni:

$$(5.6) \begin{cases} y = \ln\left(ln\left(\frac{1}{1}-F(t)\right)\right); \\ b = -\beta * \ln(\theta) \\ t' = (t-\gamma) \\ x = \ln t' \\ a = \beta \end{cases}$$

È possibile ricavare la retta $y = ax + b$ dove β rappresenta la pendenza della retta che interseca l'asse delle ascisse quando $F(t)$ assume valore 0,632 (Furlanetto, 2006 e Tertan, 2016). Tale dissertazione è utile al fine di descrivere alcune proprietà dei tre parametri fondamentali:

- γ descrive il tempo di vita garantita ovvero il minimo valore in cui il componente è in grado di sopravvivere con probabilità 100%. Fintanto che $t < \gamma$ il tasso di guasto $\lambda(t)$ è nullo.

- β: per lo stadio di usura deve essere > 1 e, per tenere conto della modalità aleatoria dell'evento, deve essere < 5.
- θ: il parametro di scala, o di vita caratteristica, è il tempo che trascorre tra il tempo γ e il tempo con cui si prevede che il componente abbia probabilità di guasto 63,2% ($F(t) = 0{,}632$). Assumendo che il tempo di vita garantita sia nullo, ovvero la sua inesistenza, θ è pari al tempo entro cui il componente ha probabilità di guasto 63,2%.

Nel campo dell'usura, per valori di β elevati, a parità di θ, corrisponde una crescita del tasso di guasto (Figura 66) (Tertan, 2016):

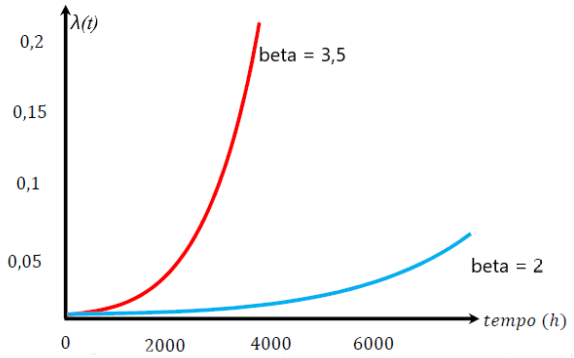


Figura 66 - Tasso di guasto al variare di Beta, a parità di Theta (Fonte: Tertan, 2016)

5.1.2. *Dall'analisi di Weibull alla manutenzione preventiva*

Dal paragrafo precedente è chiaro come la funzione di affidabilità viene espressa nella teoria di Weibull tramite l'equazione:

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\theta}\right)^{\beta}} \quad (5.7)$$

e, quando il guasto avviene per usura eccessiva, i parametri assumono il significato di:

- β: descrive l'usura del componente ($1 < \beta < 5$, stadio di usura);
- θ: descrive la resistenza temporale residua, utile per normalizzare il MTBF;

fissando il tasso di usura a:

$$\lambda(t) = \left(\frac{\beta}{\theta}\right) * \left(\frac{t}{\theta}\right)^{\beta-1} \quad (5.8)$$

I metodi per ricavare i costi unitari attesi, da cui l'obiettivo della loro minimizzazione, possono seguire due diverse politiche:

1. *Age-Based Replacement Policy*: si effettua un intervento definito "as-good-as-new", schematizzato in Figura 67, ovvero stabilire, a seguito di un guasto, l'intervento di manutenzione preventiva sempre dopo il tempo t_p.

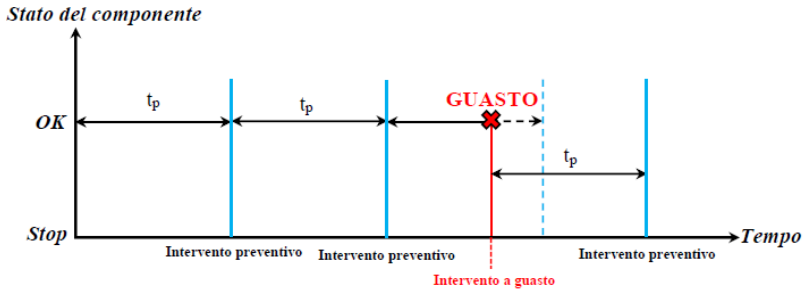


Figura 67 - Age-Based Replacement Policy (Fonte: Tertan, 2006)

2. *Constant-Interval Replacement Policy*: l'intervallo t_p è mantenuto costante nonostante il guasto (Figura 68).

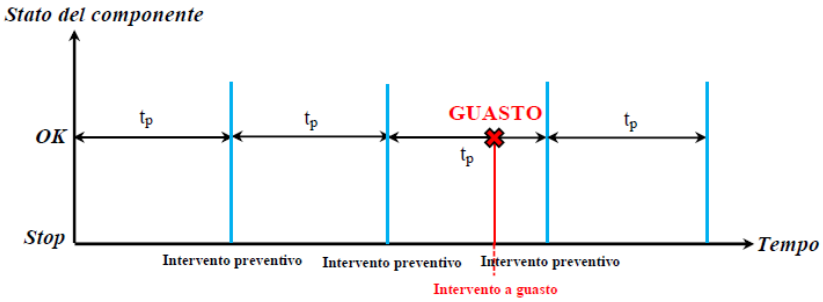


Figura 68 - Constant-Interval Replacement Policy (Fonte: Tertan, 2006)

Costo unitario atteso

Il costo unitario atteso $CUA(t_p)$ è descritto come somma delle voci di costo di:

- C_p : Costi dell'intervento per la manutenzione preventiva;
- C_f : Costi dell'intervento a guasto;

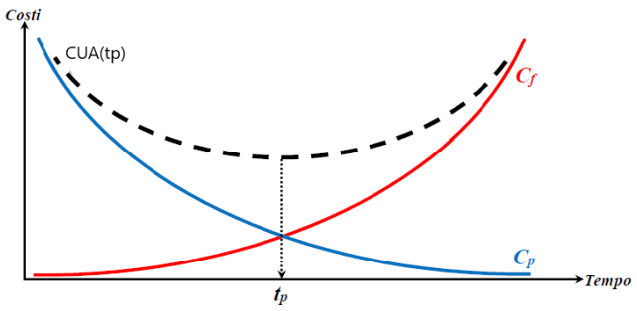


Figura 70 - Costo unitario atteso (Fonte: Tertan, 2006)

C_p e C_f vengono calcolati a partire dalle singole voci di costo, ad esempio manodopera, prezzo del ricambio, costo del fermo produttivo, costo della struttura e tutte le voci di costo che si ritengono utili al fine dell'analisi. Esse variano da componente a componente e da caso a caso, si rimanda all'applicazione del metodo sulle ruote ferroviarie per l'esemplificazione di questo calcolo. Nota la composizione, è possibile definire le equazioni dei costi unitari come somma delle due, rapportate all'affidabilità caratteristiche del tempo *t-esimo* (Figura 70). In particolare:

$$CUA(t) = \frac{Cp * R(t) + Cf * (1 - R(t))}{\int_0^t R(t)dt} \quad (5.9)$$

La mutua dipendenza tra l'affidabilità *R(t)*, il *MTBF* e il costo unitario atteso *CUA(t)* impone di operare con un metodo iterativo, facendo tendere *t* ad infinito e ricercando successivamente il valore ottimo in corrispondenza del minimo *CUA(t)*. Per la presenza dell'integrale a denominatore, si rende necessario operare con metodi di approssimazione d'integrazione, quali metodo del rettangolo, del trapezio o di Simpson. In tal caso si decide di utilizzare la regola del rettangolo (Figura 70) per la sua facilità e la sua buona approssimazione nel caso di fitting con cadenzamento ampio (dato dalla scarsità di dati a disposizione), in particolare:

$$\int_0^t R(t)dt = \int_0^{t-\Delta t} R(t)dt + \frac{R(t) + R(t - \Delta t)}{2} \Delta t \quad (5.10)$$

dove:

$$\Delta t = t_i - t_{i-1} \quad (5.11)$$

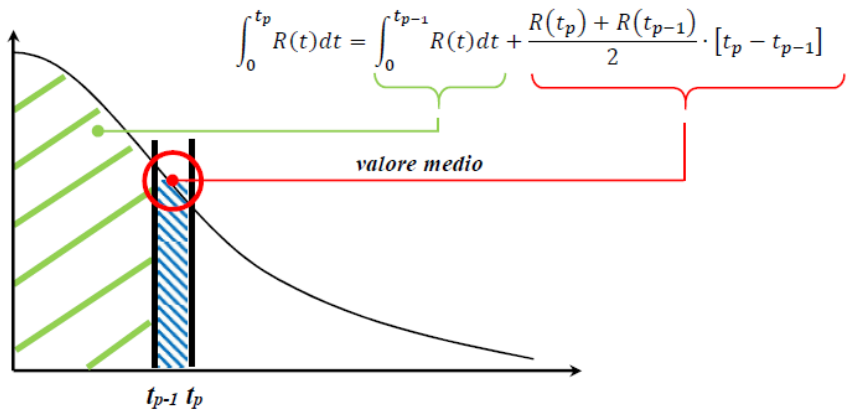


Figura 9 - Metodo del rettangolo (Fonte: Tertan, 2006)

5.1.3. Descrizione del metodo e relazioni tra le grandezze

Verrà qui esposto il metodo a livello teorico, prendendo dei valori rappresentativi al fine di valutare il mutuo rapporto tra le grandezze. Per il caso studio si rimanda al *paragrafo 5.2*.

Inizialmente bisognerà far riferimento ad un MTBF di primo tentativo, non possedendo sufficienti dati per stabilirne uno certo. Esso si baserà sia sull'esperienza maturata dal personale dell'officina sia sui dati storici a disposizione. Attraverso i valori calibrati di θ e β si potrà ottenere la convergenza su un t_p ottimizzato al fine di ridurre i costi economici complessivi. Il metodo iterativo si compone dei seguenti passaggi:

1. Analisi dei dati storici e decisione del MTBF di primo tentativo:

   I dati di input necessari per iniziare l'analisi sono le principali fonti di costo monetario per la manutenzione preventiva C_p e i costi di un'eventuale guasto C_f. Inoltre dall'analisi storica dei dati proveniente dall'officina di manutenzione è semplice stabilire un MTBF di primo tentativo (*MTBF**), stimabile come media dei valori significativi a discrezione del progettista.

2. Calibrazione del modello (calcolo dei parametri θ e β):

   Si fissano ora diversi valori di θ e β, in prima istanza con valori approssimativi per valutare l'andamento e successivamente saranno dettagliati nell'intervallo di interesse. Attraverso l'equazione di Weibul (5.7) è possibile stimare l'affidabilità *R(t)* e svolgendo l'integrazione come esposto nel *paragrafo 5.1.2*, si individua il *MTBF* per le diverse coppie di valori. Il MTBF è rappresentato dal valore massimo di integrazione. Si può riassumere per chiarezza i risultati in un'unica tabella in cui si

può apprezzare l'andamento del MTBF al variare dei due parametri. Inoltre è possibile trovare la coppia θ e β alla quale corrisponde il *MTBF* di primo tentativo.

3. Stima dei costi unitari attesi CUA(t):
   Attraverso i valori di θ e β appena calibrati, si calcolano i costi unitari attesi attraverso l'equazione 5.9 e i rispettivi tempi t da adottare per ottenere il relativo costo. Il tempo di manutenzione preventiva ottimale t_p sarà quello riferito al minimo costo.

4. Variazione del parametro di usura β e dei rispettivi costi:
   Si possono valutare le differenze di prezzo nel caso dell'adozione di parametri di usura differenti e i relativi tempi al fine di ottenerli. Sarebbe anche possibile, attraverso questa tabella, stabilire il costo qualora il parametro di usura non fosse quello correttamente calcolato, fornendo al modello una maggiore elasticità. A tal proposito va ricordato che, poiché i parametri θ e β sono puramente matematici, è necessario un determinato tempo al fine di stabilire la correlazione tra essi e le reali condizioni di usura del pezzo.

Si analizzano ora con maggior dettaglio i passaggi, inserendo nel modello valori dimostrativi.

Si ottengono inizialmente i valori di *MTBF* date le coppie di θ e β attraverso una tabella come quella proposta in Tabella 21:

beta	0,25	0,5	0,75	1	1,25	1,5
theta	1000	1000	1000	1000	1000	1000
MTBF	10123,61	1999,59	1190,64	1000,00	931,38	902,75
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
1	0,918543	0,984436	0,997196	0,9995	0,999911	0,999984189
2	1,741781	1,947004	1,989686	1,998001	1,999611	1,999923658
3	2,542144	2,898486	2,978611	2,995505	2,999048	2,999796787
4	3,326633	3,841193	3,964353	3,992011	3,998195	3,999588161
5	4,098707	4,776415	4,947149	4,987521	4,997028	4,99928494
6	4,860488	5,705013	5,927172	5,982036	5,995529	5,99887587
7	5,613429	6,627615	6,904553	6,975558	6,993683	6,998350799
8	6,358595	7,544704	7,879401	7,968086	7,991477	7,997700411
9	7,096804	8,456671	8,851805	8,959622	8,988898	8,996916043
10	7,828706	9,363836	9,821842	9,950167	9,985936	9,995989568

Tabella 21 - Esempio valori MTBF al variare di Beta e Theta: applicazione delle equazioni 5.7 e 5.10

(vengono riportati solo i primi passaggi come esemplificazione)

Il valore del MTBF corrisponderà al valore massimo presente nella rispettiva colonna che, per t tendente ad infinito, converge ad un valore pressoché costante. Effettuando variazione di θ

sulla seconda riga, si ottengono i valori di *MTBF* al variare dei due parametri (θ e β) (Tabella 22):

MTTF*=1000h		Beta				
		1	1,25	1,5	1,75	2
Theta	900	900	838,2454	812,4708	801,556	797,6042
	950	950	884,8146	857,608	846,0868	841,9156
	1000	1000	931,3838	902,7453	890,6177	886,2269
	1150	1150	1071,091	1038,157	1024,21	1019,161
	1200	1200	1117,661	1083,294	1068,741	1063,472

Tabella 22 - Valori di MTBF al variare di Beta e Theta

(vengono riportati solo i primi passaggi come esemplificazione)

Ottenuta questa tabella, ed eseguendo un fitting di theta più accurato, è possibile apprezzare l'andamento del MTBF al variare dei due parametri (Figura 72) qualora si volesse operare con un metodo grafico più approssimativo rispetto un metodo matematico:

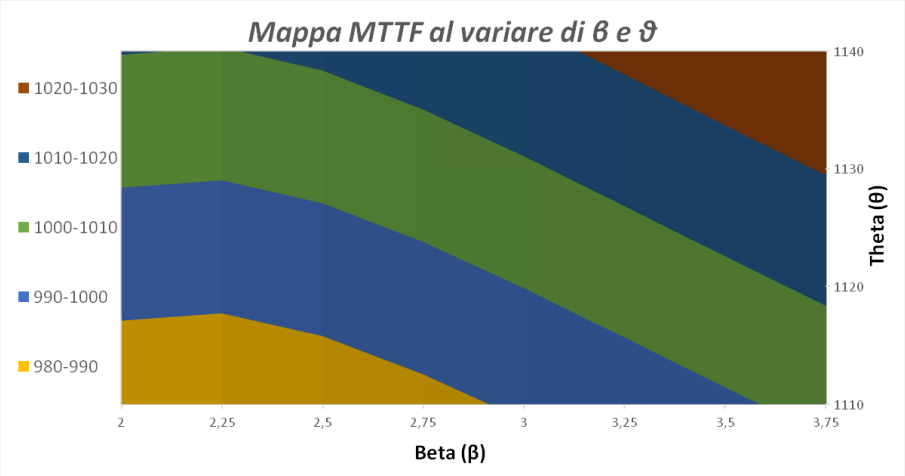


Figura 72 - Mappa dei MTBF (Fonte: Tertan, 2006)

Individuate in Tabella 22 le coppie di valori che soddisfano il *MTBF* di primo tentativo, è ora possibile calcolare i costi attraverso l'equazione 5.9 (Tabella 23):

t	R(t)	Int[R(t)]	Cprev	Cguasto	Ctot
1	1,000	1,00	599,92	0,25	600,18
2	0,999	2,00	299,91	0,29	300,20
3	0,999	3,00	199,91	0,31	200,22
4	0,999	4,00	149,90	0,33	150,23
5	0,998	5,00	119,90	0,35	120,24
6	0,998	5,99	99,89	0,36	100,25
7	0,997	6,99	85,60	0,37	85,97
8	0,997	7,99	74,89	0,38	75,27
9	0,996	8,98	66,55	0,39	66,94
10	0,996	9,98	59,88	0,40	60,28

Tabella 23 - Calcolo dei CUA(t) in funzione di Beta e Theta scelto

(vengono riportati solo i primi passaggi come esemplificazione)

Dalla precedente tabella si ricavano i costi unitari attesi minimi e il relativo tempo che rappresenterà il tempo di manutenzione preventiva ottimo t_p, soddisfando il *MTBF* proveniente dai dati storici. Al fine di mantenere un *MTBF* prestabilito, ed essendo θ un parametro di resistenza non direttamente controllabile dall'esercizio, occorrerà variare β. I costi unitari attesi decrescono all'aumentare di β ma ne deriverebbe un decremento di resistenza residua θ. La scelta di β deve essere raffinata attraverso la pratica quotidiana e monitoraggi periodici del componente, valutando lo stato di usura e la sua evoluzione. Si può inoltre valutare la variazione dei costi unitari attesi al variare di β, ottenendo un nuovo tempo di manutenzione preventiva ottimo t_p (Tertan, 2016). Questo passaggio è velocemente svolto andando a variare il parametro di input della Tabella 23. Si fornisce perciò all'officina una finestra di costi unitari attesi e relativi tempi di manutenzione preventiva per diversi valori di usura adottati. Si raccomanda inoltre un costante monitoraggio dei dati e un'evoluzione del modello appena esposto a seguito della maggiore disponibilità di dati storici.

Principali relazioni tra le grandezze del modello

Si illustrano qui le principali relazioni tra le grandezze presenti nel modello al fine di avere una visione teorica più chiara e assumere la conoscenza di dove operare per ottenere risultati diversi.

Fissato un valore di θ (il parametro di resistenza quando calibrato si può ipotizzare ragionevolmente costante), si osserva al variare del rapporto C_f / C_p come varia il costo unitario atteso *CUA(t)* in funzione di β.

	Cf	1000	theta	1000		
	Cp	1	5	10	25	50
	Cf/Cp	1000,00	200,00	100,00	40,00	20,00
Beta	**1**	1,00005354	1,000268035	1,000536153	1,001340508	1,0026811
	1,2	0,495908258	0,646806772	0,723672432	0,834924133	0,922042475
	1,4	0,252607141	0,39917071	0,485218562	0,625040422	0,750997465
	1,6	0,145260357	0,265055481	0,342857321	0,479746694	0,614145933
	1,8	0,09222755	0,188222793	0,255544684	0,381343642	0,512872806
	2	0,063223222	0,141126578	0,199166831	0,31292005	0,437811713
	2,2	0,045994473	0,110481923	0,160935413	0,26374048	0,381136673
	2,4	0,035060391	0,089522142	0,1338918	0,227266926	0,337409065
	2,6	0,027738322	0,074579923	0,114064448	0,199454651	0,302957587
	2,8	0,022612652	0,063555117	0,099080347	0,177727819	0,275294181
	3	0,018893779	0,055179776	0,087464412	0,16039606	0,252701837
	3,2	0,016110896	0,048661165	0,078258876	0,146317563	0,233972828
	3,4	0,013974669	0,04347812	0,07082602	0,134699907	0,218239265

Tabella 24 - CUA(t) al variare del rapporto Cf/Cp con Cf, Theta costanti

Si nota innanzitutto come, all'aumentare di β, la riduzione di *CUA(t)* risulta sempre maggiore. Tale decrescita è maggiormente marcata per bassi rapporti di C_f / C_p. Tertan (2016) esegue

tale procedura con valori di θ differenti e mettendo insieme i risultati, ottenendo il seguente grafico (Figura 73):

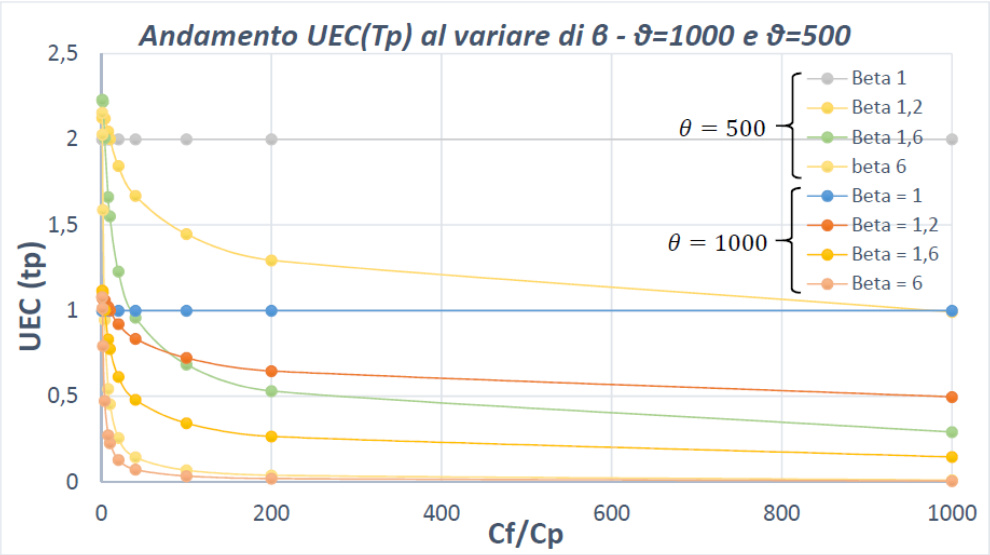


Figura 73 - Variazione di CUA al variare di Beta e Theta, al variare di Cf/Cp (Fonte: Tertan, 2016)

Si evince che:

- Al diminuire di θ (e quindi del parametro di resistenza) i costi unitari risultano maggiori, a parità di C_f / C_p;
- All'aumentare di β (e quindi del parametro di usura) la differenza tra i costi unitari attesi si riducono, a parità di C_f / C_p;
- All'aumentare di β (e quindi del parametro di usura), i costi unitari attesi si riducono maggiormente per bassi rapporti di C_f / C_p;

5.2. Caso studio: la manutenzione delle ruote ferroviarie sulla Linea Canavesana

Nel presente paragrafo si farà uso della teoria esposta nel *capitolo 4* e nel *paragrafo 5.1*, studiando il caso studio della tornitura delle ruote del materiale rotabile per la Ferrovia Canavesana. I soggetti dello studio sono stati presentati nel *paragrafo 1.4*: si decide di simulare un totale di 20 convogli Ale501-Le220-Ale502 pensati per l'esercizio tra Rivarolo e Chieri. Come si è già accennato nel *paragrafo 4.3.3*, le ruote ferroviarie non possiedono a priori un tempo di manutenzione preventiva in quanto la loro usura è fortemente influenzata dal tracciato della linea e dal comportamento di guida dei macchinisti, perciò sono difficili previsioni a priori da parte della casa costruttrice o dell'azienda stessa. Questo comporta un monitoraggio ogni volta che i convogli entrano in officina e la valutazione a breve termine dell'intervento manutentivo. Non si può parlare di "rottura" del pezzo ma di eccessiva usura e non conformità per operare in sicurezza per l'esercizio. Si vedrà quindi quali sono i fattori che entrano in gioco nella definizione del costo a rottura. La decisione di studiare l'usura delle ruote e la loro manutenzione deriva principalmente dalle seguenti motivazioni:

- nell'anno corrente l'officina si trova ad affrontare questo tema e si riscontrano le difficoltà derivanti dalla mancata pianificazione preventiva del fenomeno,
- l'operazione di tornitura delle ruote è molto onerosa sia in termini temporali sia di impiego di risorse e personale, obbligando l'azienda ad avvalersi di servizi erogati da ditte esterne con conseguenti costi maggiorati rispetto una gestione interna,
- seppur applicato ad un caso specifico, studiare un fenomeno di primaria importanza per la sicurezza ferroviaria ed applicare un metodo estendibile a tutte le imprese ferroviarie, cercando di ridurre lunghi fermi del materiale rotabile, perdite economiche e difficoltà di gestione,
- completare le lacune della trama manutentiva, al fine di fornire all'azienda dati sufficienti ad una pianificazione a lungo termine e quindi un'analisi complessiva dei rapporti tra esercizio e manutenzione.

Si applicherà ora il metodo visto nel *paragrafo 5.1*.

5.2.1. Analisi dei dati storici e definizione del MDBF di primo tentativo

L'officina di manutenzione è tenuta a registrare tutti gli interventi e tenerne memoria storica all'interno dei propri archivi. Tali documenti possono essere soggetti a controlli ANSF che valutano la corretta procedura sia dell'intervento stesso sia la conformità con le scadenze temporali o distanziometriche imposte (*paragrafo 4.2.3*). Si riportano in Tabella 25 le distanze percorse dal materiale rotabile al momento della tornitura delle ruote. L'attuale impostazione non richiede un unico intervento su tutte le 8 ruote del convoglio ma, per semplicità organizzativa dell'officina e poiché l'usura riscontrata è diversa ma non presenta grosse differenze, si procede ad un'unica tornitura per l'intero convoglio in un'unica soluzione. Questa filosofia è facilmente applicabile a convogli corti come quelle in esame, per composizioni più lunghe il metodo dovrà essere applicato differenziando le parti (materiale trainato e macchine di trazione oppure convogli di estremità e convogli centrali).

Dati storici	Chilometri torniture officina Rivarolo				
TTR1	300000	600000	796000	956049	
TTR2	300000	600000	794000	951517	
TTR3	300000	600000	889000		
TTR4	300000	600000	900000	911000	1070069
TTR5	300000	600000	766000	1014253	
TTR6	300000	600000	717000	962000	
TTR7	300000	570000	874000		
TTR8	300000	600000	672000	932000	
TTR9	300000	561000			
TTR10	300000	600000	625000	875000	
TTR11	300000	376000	642000	766439	
TTR12	300000	448000	713000		
TTR13	300000	515000	655544		
TTR14	300000	383000			
TTR15	300000	552599			
TTR16	300000	461000			
TTR17	300000	600000	622000		
TTR18	300000	467000			
TTR19	300000	450500			
TTR20	300000	434000			

Tabella 25 - Dati storici tornitura delle ruote SFM1 (Fonte: Gruppo Torinese Trasporti)

Poiché il modello ha una natura statistica, si raccomanda il costante aggiornamento di questi dati e una nuova applicazione del modello nel tempo, al fine di ottenere risultati sempre più precisi ed attinenti alla realtà. Come si evince dalla Tabella 25, la maggior parte delle ruote hanno subito dalle 3 alle 5 torniture e quindi sono considerabili pezzi già entrati nel campo dell'usura. Al fine di trovare un MDBF di primo tentativo si esegue la differenza tra i termini

consecutivi degli interventi, al fine di trovare la distanza percorsa tra un intervento e quello successivo, e si esegue la media di essi. Si decide di non applicare alcun coefficiente di sicurezza data l'attendibilità e la precisione dei valori. Si trova un Mean Distance Between Failure di primo tentativo (*MDBF**) pari a 205801 km. Esso rappresenta il valore medio entro cui la ruota non è più in grado di rispettare le condizioni di sicurezza viste nel *paragrafo 4.4*: benché rappresenti la distanza chilometrica media più lunga tra un intervento e l'altro vedremo come non rappresenti il valore ottimale al fine di minimizzare i costi. La diminuzione di tale valore, attraverso una corretta pianificazione tra esercizio e manutenzione, non comporta un problema se il giro macchine risulta correttamente progettato e quindi orientato ad eliminare i conflitti tra le due parti dell'impresa. Al contrario attualmente, non avendo pianificato tale valore ma derivante esclusivamente dall'esperienza e dalle condizioni contingenti, la conoscenza di questo risulta pressoché inutile e spesso è difficile trovare un compromesso tra l'esercizio e la manutenzione.

5.2.2. Definizione dei costi

Il metodo è fortemente influenzato dalla definizione dei costi perciò richiede grande cura nella definizione di essi.

Costi dell'intervento preventivo

I costi qui presentati sono da intendersi come i costi monetari che l'azienda deve sostenere in caso si decida di adottare la politica manutentiva proposta dai risultati dell'applicazione di questo metodo. Per l'esecuzione delle torniture interne all'azienda, il costo si compone delle seguenti voci:

$$C_p = N_{operatori} * MTTR_{preventivo} * C_{1operatore} + C_{manovra} + S_{asportato} * C_s \quad (5.12)$$

dove:

- $N_{operatori}$: corrisponde al numero di operatori necessari al fine di eseguire l'intervento;
- $MTTR_{preventivo}$: corrisponde al tempo di lavorazione della singola ruota;
- $C_{operatore}$: pari al compenso orari dell'operatore di officina;
- $C_{manovra}$: è il costo stimato per ogni manovra, comprendente il tempo impiegato e il personale coinvolto nella manovra;
- $S_{asportato}$: è pari all'acciaio asportato durante la tornitura. Questa voce di costo si basa sull'ipotesi che maggiore è l'usura e maggiore è l'acciaio asportato: più materiale

viene tolto al momento delle riprofilatura e minore sarà la vita utile della ruota in quanto viene consumata con maggiore frequenza.[12]

- C_s: al fine di quantificare la perdita monetaria del materiale asportato, si moltiplica per il costo al reso dell'acciaio sul mercato.

Per la singola ruota il costo preventivo risulta:

Costi preventivi		*Nuova politica preventiva*
Noperatori	2	-
MTTRpreventivo	8	h
Coperatore	22	€/h
Cmanovra	240	€
Acciaio asportato per ora di esercizio	0,000121	kg
Prezzo acciaio al reso	0,68	€/kg
Cp	**592,00**	**€/ruota**

Tabella 26 - Costi preventivi per la riprofilatura della singola ruota (Fonte: Gruppo Torinese Trasporti)

Costo dell'intervento "a rottura"

Come già anticipato non si può parlare di rottura, tuttavia verrà mantenuta la dicitura per creare un nesso con la teoria esposta precedentemente e l'applicazione al caso di studio. Il costo qui rappresentato rappresenta l'attuale politica dell'impresa riguardo la riprofilatura della ruota e si compone di:

$$C_f = N_{operatori} * MTTR_{preventivo} * C_{1operatore} + C_{manovra} + S_{asportato} * C_s + C_{ext} + C_{macchinista} * t_{macchinista} \quad (5.13)$$

dove:

- N_{ruote_ext}: il numero medio di ruote che l'azienda non riesce a riprofilare internamente e perciò si avvale di servizi esterni;
- C_{ext}: costo che l'azienda affronta ogni anno per la tornitura esterna all'azienda, pari a $N_{ruote_ext} * C_{esterno,Trenitalia}$;
- $C_{macchinista}$: il costo del macchinista per il trasferimento del materiale rotabile fino all'officina di manutenzione esterna;
- $t_{macchinista}$: il tempo impiegato per il trasferimento.

[12] Il valore $S_{asportato}$ si basa sul caso studio affrontato dalla Lucchini R.S. (Cantini et al. (2016)), casa costruttrice delle ruote ferroviarie. Lo studio, effettuato su treni ad Alta Velocità, introduce nella funzione di costo l'addendo $S_{asportato} * C_s$ e lega esso all'affidabilità del pezzo, mi modo analogo al metodo qui proposto.

Il Gruppo Torinese Trasporti si avvale della tornitura effettuata presso l'officina di Trenitalia nei pressi della stazione di Torino Lingotto. Si raccolgono nella seguente tabella i dati dell'attuale politica di manutenzione delle ruote:

Costi failure		*Attuale politica*
Noperatori	2	-
MTTRpreventivo	8	h
Coperatore	22	€/h
Cmanovra	240	€
Acciaio asportato per ora di esercizio	0,000121	kg
Prezzo acciaio al reso	0,68	€/kg
n ruote ext	16	ruote
Cext	6700	€
Cmacchinista	22	€/h
tmacchinista	3	h
Costo azienda esterna (Trenitalia)	418,75	€/ruota
Cf	7358,00	€/ruota

Tabella 27 – Costi "a guasto" per la riprofilatura della singola ruota (Fonte: Gruppo Torinese Trasporti)

Come si può osservare confrontando le Tabella 26 e Tabella 27, il costo della riprofilatura esterna è ingente e ricopre l'elemento di maggiore criticità nell'aggravio dei costi.

5.2.3. Passaggio dal MDBF al MTBF**

Dall'orario grafico (*paragrafo 2.1.3*) si sono ricavate le percorrenze settimanali per ogni convoglio. Conoscendo il tempo ciclo è facile determinare anche i minuti di esercizio che ogni treno compie settimanalmente. Si riportano qui le tabelle riassuntive dei dati raccolti sia in termini chilometrici (Tabella 28) sia in termini temporali (Tabella 29):

Giro macchine in km	Lunedì	Martedì	Mercoledì	Giovedì	Venerdì	Sabato	Domenica
TTR1	436,95	436,95	436,95	436,95	436,95	436,95	456,208
TTR2	456,208	456,208	456,208	456,208	456,208	456,208	342,156
TTR3	228,104	228,104	228,104	228,104	228,104	342,156	-
TTR4	387,104	387,104	387,104	387,104	387,104	114,052	-
TTR5	228,104	228,104	228,104	228,104	228,104	114,052	-
TTR6	228,104	228,104	228,104	228,104	228,104	114,052	-
TTR7	402,398	402,398	402,398	402,398	402,398	402,398	-
Media sui singoli giorni	338,139	338,139	338,139	338,139	338,139	282,838	399,182
Media sulla settimana	332	km/giorno					
Media sul mese	9963	km/mese					
Media annua	17270	km/anno					

Tabella 28 - Percorrenze chilometriche SFM1

Giro macchine in min	Lunedì	Martedì	Mercoledì	Giovedì	Venerdì	Sabato	Domenica
TTR1	624	624	624	624	624	624	680
TTR2	680	680	680	680	680	680	510
TTR3	340	340	340	340	340	510	0
TTR4	588	588	588	588	588	170	0
TTR5	340	340	340	340	340	170	0
TTR6	340	340	340	340	340	170	0
TTR7	584	584	584	584	584	584	0
Media sui singoli giorni	499	499	499	499	499	415	170
Giro macchine in h	Lunedì	Martedì	Mercoledì	Giovedì	Venerdì	Sabato	Domenica
TTR1	10,40	10,40	10,40	10,40	10,40	10,40	11,33
TTR2	11,33	11,33	11,33	11,33	11,33	11,33	8,50
TTR3	5,67	5,67	5,67	5,67	5,67	8,50	0,00
TTR4	9,80	9,80	9,80	9,80	9,80	2,83	0,00
TTR5	5,67	5,67	5,67	5,67	5,67	2,83	0,00
TTR6	5,67	5,67	5,67	5,67	5,67	2,83	0,00
TTR7	9,73	9,73	9,73	9,73	9,73	9,73	0,00
Media sui singoli giorni	8,32	8,32	8,32	8,32	8,32	6,92	2,83
Media sulla settimana	7,34	h/giorno					
Media sul mese	220,18	h/mese					
Media annua	382	h/anno					

Tabella 29 - Percorrenze in minuti e ore SFM1

Attraverso questi dati è facile passare dal Mean Distance Between Failure (*MDBF**) al Mean Time Between Failure di primo tentativo (*MTBF**). Poiché la programmazione attualmente è svolta su base mensile, si decide di mantenere tale unità temporale di riferimento, convertendoli solo successivamente in ore equivalenti. In particolare si esegue:

$$Mesi\ equivalenti = \frac{MDBF^*}{Media\ sul\ mese\ [km]} = \frac{205841\ km}{9963\ km/mese} = 21\ mesi$$

$$Ore\ equivalenti = Mesi\ equivalenti * Media\ sul\ mese\ [h] = 21\ mesi * 220{,}18 \frac{h}{mese}$$
$$= 4549 = MTBF^*$$

Da questo valore è interessante trovare il valore attuale unitario per la manutenzione, al fine di eseguire un confronto a posteriori. In particolare:

$$CU_{attuale} = \frac{C_f}{Ore\ equivalenti} = 1{,}62\ €/h$$

5.2.4. *Calibrazione di θ e β*

Vengono fissati i valori di β compresi tra 1 e 5, al fine di rispettare la condizione di campo di usura. Si fa variare successivamente i valori di θ, variando la riga verde in Tabella 30.

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	5133	5133	5133	5133	5133	5133	5133	5133	5133	5133	5133	5133	5133	5133	5133	5133	5133
MTBF	5133	4780,793	4633,792	4571,541	4549,003	4546,454	4554,325	4567,635	4583,664	4600,879	4618,402	4635,726	4652,564	4668,76	4684,238	4698,971	4712,96

Tabella 30 - Calibrazione Theta e Beta

Si inseriscono questi valori all'interno delle equazioni di affidabilità e *MTB*F, già viste in precedenza:

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\theta}\right)^{\beta}} \quad (5.14)$$

$$\int_0^t R(t)dt = \int_0^{t-\Delta t} R(t)dt + \frac{R(t) + R(t-\Delta t)}{2}\Delta t \quad (5.15)$$

Questa operazione è eseguita semplicemente impostando le seguenti tabelle, di cui si riportano solo i primi passaggi:

t	R(t)	R(t)	R(t)	R(t)	R(t)	R(t)	R(t)	R(t)	R(t)	R(t)	R(t)	R(t)	R(t)	R(t)	R(t)	R(t)	R(t)
0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	0,999805	0,999977	0,999997	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	0,99961	0,999945	0,999992	0,999999	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
3	0,999416	0,999909	0,999986	0,999998	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
4	0,999221	0,99987	0,999978	0,999996	0,999999	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
5	0,999026	0,999828	0,99997	0,999995	0,999999	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
6	0,998832	0,999784	0,99996	0,999993	0,999999	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
7	0,998637	0,999738	0,99995	0,99999	0,999998	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
8	0,998443	0,99969	0,999938	0,999988	0,999998	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
9	0,998248	0,999641	0,999927	0,999985	0,999997	0,999999	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
10	0,998054	0,999591	0,999914	0,999982	0,999996	0,999999	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Tabella 31 - Calcolo affidabilità

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))	Int(R(T))
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0,999903	0,999988	0,999999	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1,99961	1,99995	1,999993	1,999999	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
3	2,999123	2,999877	2,999983	2,999997	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
4	3,998442	3,999766	3,999965	3,999995	3,999999	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
5	4,997566	4,999615	4,999939	4,99999	4,999998	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
6	5,996495	5,999421	5,999903	5,999984	5,999997	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
7	6,995229	6,999182	6,999858	6,999975	6,999996	6,999999	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
8	7,993769	7,998896	7,999802	7,999964	7,999993	7,999999	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
9	8,992115	8,998562	8,999735	8,999951	8,999991	8,999998	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
10	9,990265	9,998178	9,999655	9,999934	9,999987	9,999998	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10

Tabella 32 - Calcolo integrale dell'affidabilità

Il *MTBF*, riportato nella riga grigia in Tabella 30, rappresenta il valore massimo dell'integrazione per ogni coppia di θ e β.

Al variare di θ, vengono riassunti i risultati in un'unica tabella riportante i valori di *MTBF* al variare della coppia dei parametri. Si ricercano i valori di *MTBF* pari al valore del *MTBF** pari a 4549, si dettaglia la tabella con i valori della zona contenente *MTBF**.

Calibrazione di θ e β		Beta															
		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	931	903	891	886	886	887	890	893	896	900	903	906	910	913	915	918
	1250	1164	1128	1113	1108	1107	1109	1112	1116	1120	1125	1129	1133	1137	1141	1144	1148
	1500	1397	1354	1336	1329	1329	1331	1335	1339	1345	1350	1355	1360	1364	1369	1373	1377
	1750	1630	1580	1559	1551	1550	1553	1557	1563	1569	1575	1580	1586	1592	1597	1602	1607
	2000	1863	1805	1781	1772	1771	1775	1780	1786	1793	1799	1806	1813	1819	1825	1831	1836
	2250	2096	2031	2004	1994	1993	1996	2002	2009	2017	2024	2032	2039	2047	2053	2060	2066
	2500	2328	2257	2227	2216	2214	2218	2225	2232	2241	2249	2258	2266	2274	2281	2289	2295
	2750	2561	2483	2449	2437	2436	2440	2447	2456	2465	2474	2484	2493	2501	2510	2517	2525
	3000	2794	2708	2672	2659	2657	2662	2670	2679	2689	2699	2709	2719	2729	2738	2746	2755
	3250	3027	2934	2895	2880	2879	2884	2892	2902	2913	2924	2935	2946	2956	2966	2975	2984
	3500	3260	3160	3117	3102	3100	3105	3114	3125	3137	3149	3161	3172	3183	3194	3204	3214
	3750	3493	3385	3340	3323	3321	3327	3337	3349	3361	3374	3387	3399	3411	3422	3433	3443
	4000	3726	3611	3562	3545	3543	3549	3559	3572	3585	3599	3612	3626	3638	3650	3662	3673
	4250	3958	3837	3785	3766	3764	3771	3782	3795	3809	3824	3838	3852	3866	3878	3891	3902
	4500	4191	4062	4008	3988	3986	3993	4004	4018	4034	4049	4064	4079	4093	4107	4119	4132
	4750	4424	4288	4230	4210	4207	4215	4227	4242	4258	4274	4290	4305	4320	4335	4348	4361
	4954	4614	4472	4412	4390	4388	4396	4408	4424	4440	4457	4474	4490	4506	4521	4535	4549
	5000	4657	4514	4453	4431	4429	4436	4449	4465	4482	4499	4516	4532	4548	4563	4577	4591
	5019	4675	4531	4470	4448	4445	4453	4466	4482	4499	4516	4533	4549	4565	4580	4595	4608
	5094	4744	4599	4537	4514	4512	4520	4533	4549	4566	4583	4601	4617	4633	4649	4663	4677
	5133	4781	4634	4572	4549	4546	4554	4568	4584	4601	4618	4636	4653	4669	4684	4699	4713
	7500	6892	6680	6591	6558	6554	6566	6585	6608	6633	6658	6683	6707	6731	6753	6774	6794

Tabella 33 - MTBF con valori calibrati di Theta e Beta

Si decide di considerare valori di β interi in quanto essi sono difficili da calibrare con la reale condizione di usura e perciò non richiedono un dettaglio così elevato ma solo valori di riferimento. I valori calibrati di θ e β, evidenziati in Tabella 33 in giallo, che soddisfano il MTBF di primo tentativo (*MTBF**) sono:

Theta	Beta
5133	2
5094	3
5019	4
4954	5

Tabella 34 - Valori calibrati di Beta e Theta con MTBF* = 4549

Si vede come all'aumentare di β, che rappresenta l'usura del componente, la resistenza del pezzo (θ) diminuisce, come è coerente aspettarsi.

5.2.5. Calcolo dei costi unitari attesi e valori di t_p ottimi

Calibrati i valori di θ e β, è possibile ora calcolare i valori dei costi unitari attesi con i valori fino ad ora trovati, riassunti in Tabella 35:

Beta	5
Theta	4954
MTBF	4549
Cp	592
Cf	7358
Cf/Cp	12,42

Tabella 35 - Riepilogo valori calibrati e calcolati dai dati aziendali

Inizialmente si considera β pari al valore massimo di 5, in accordo con la politica di sfruttare maggiormente il pezzo spingendo l'usura al limite. Si procederà successivamente a valutare i risultati per le altre coppie di θ e β.

Al variare del tempo t, che rappresenterà il tempo di manutenzione preventiva da adottare, attraverso le equazioni 5.14, 5.15 e 5.9 si calcola rispettivamente l'affidabilità $R(t)$, l'integrale dell'affidabilità $IntR(t)$ e il costo unitario atteso C_{tot} (Tabella 36):

tp	R(tp)	Integrale[R(tp)]	Cprev	Cguasto	Ctot	tp
1	1	1	592,000	0,000	592,000	**1,000**
2	1	2	296,000	0,000	296,000	**2,000**
3	1	3	197,333	0,000	197,333	**3,000**
4	1	4	148,000	0,000	148,000	**4,000**
5	1	5	118,400	0,000	118,400	**5,000**
6	1	6	98,667	0,000	98,667	**6,000**
7	1	7	84,571	0,000	84,571	**7,000**
8	1	8	74,000	0,000	74,000	**8,000**
9	1	9	65,778	0,000	65,778	**9,000**
10	1	10	59,200	0,000	59,200	**10,000**

Tabella 36 - Calcolo Costi Unitari Attesi in funzione del tempo

Si riportano le rappresentazioni grafiche delle funzioni appena calcolate:

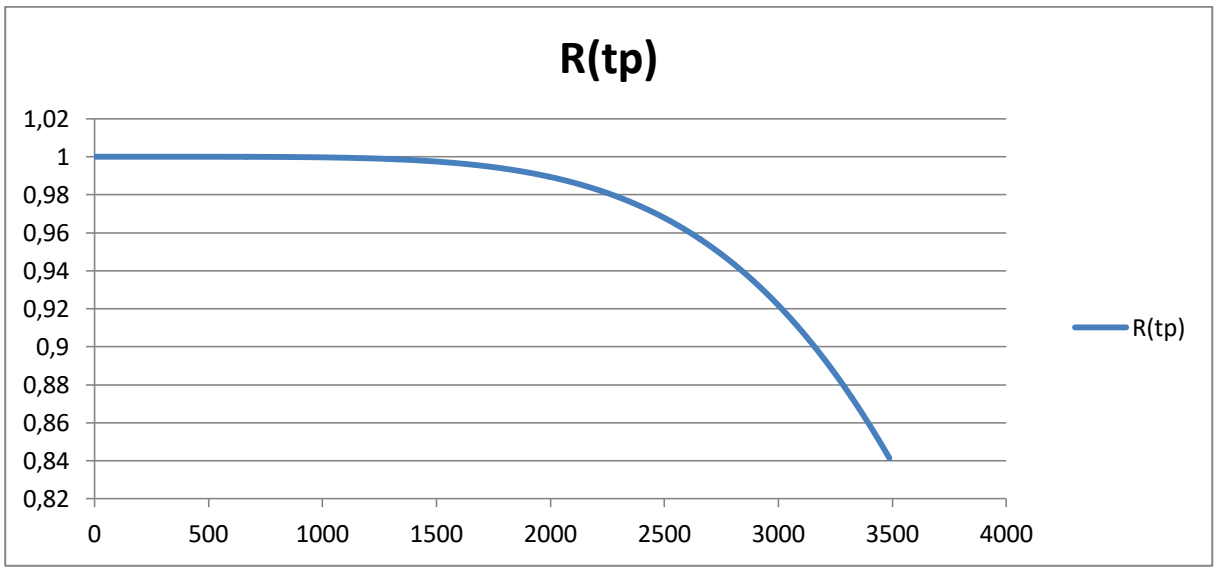


Figura 74 - Funzione Affidabilità nel tempo R(t)

L'andamento decrescente della funzione $R(t)$ rappresenta il decremento dell'affidabilità con il passare del tempo e l'aumentare dell'usura.

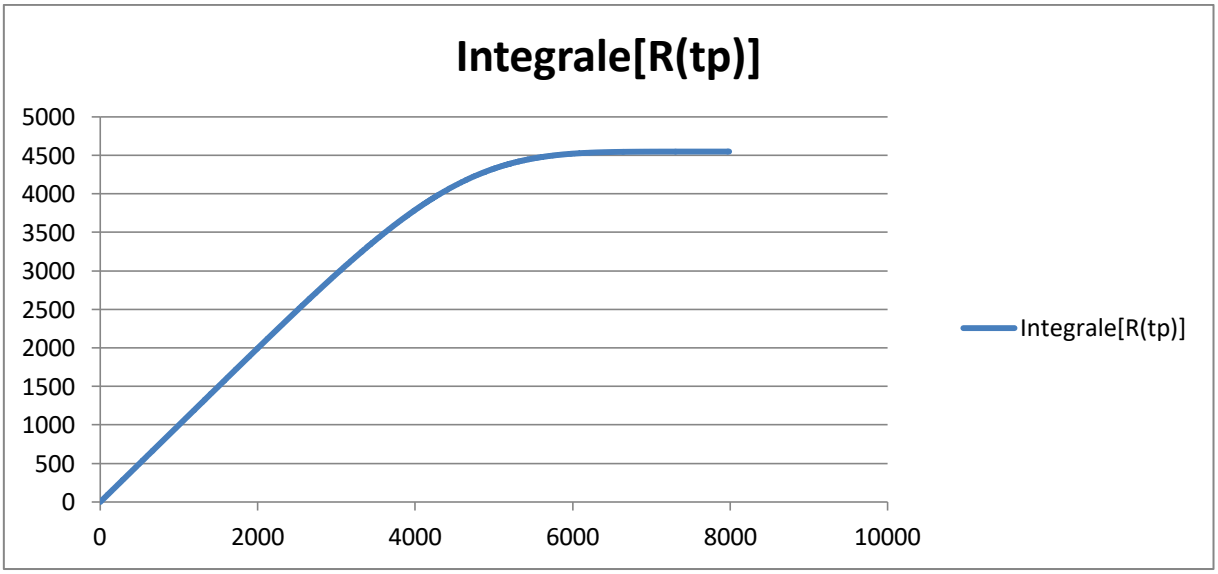


Figura 75 - Funzione Integrale dell'Affidabilità nel tempo

L'andamento crescente della funzione *IntR(t)* rappresenta un valore cumulato della funzione *R(t)* fino al raggiungimento del *MTBF*.

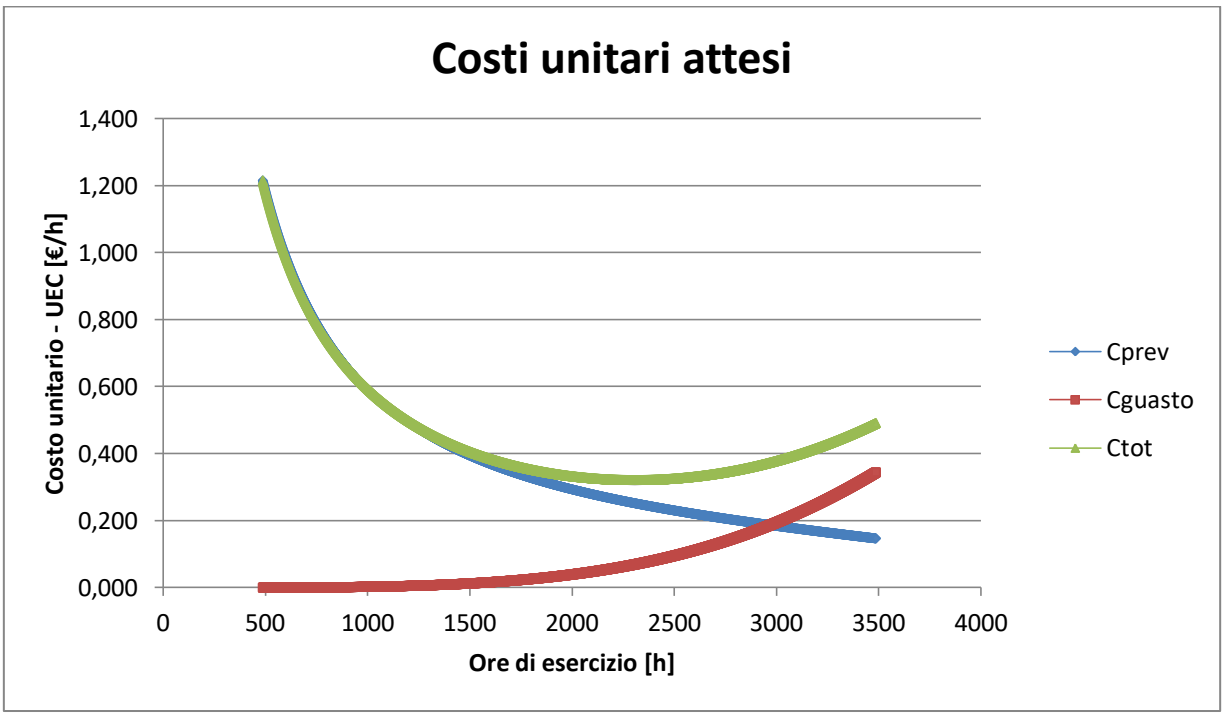


Figura 76 - Andamento dei costi unitari nel tempo

Dalla Figura 76, con andamento caratteristico già descritto in Figura 70, si trova il minimo costo unitario atteso in funzione delle ore di esercizio in cui il componente è soggetto ad usura. In particolare:

CUA ottimale	tp ottimale
0,321	2307

Tabella 37 – CUA e tp ottimale

Trovando quindi un valore di 0,32 €/h/ruota se la manutenzione preventiva delle ruote è effettuata dopo 2307 h di esercizio. Con procedimento inverso a quello descritto nel *paragrafo 5.2.3*, tali valori rappresentano circa 11 mesi di esercizio, per una distanza pari a 104616 km effettuati dal materiale rotabile.

5.2.6. Variazione di θ e β e relazioni con l'attuale programma di manutenzione

Si esegue nuovamente il processo descritto nel *paragrafo 5.2.5* e successivi con i valori di θ e β calibrati in Tabella 35. Per ogni risultato ottenuto si calcolano i mesi e i chilometri di esercizio corrispondenti. Moltiplicando il costo unitario atteso per le ore in esercizio si ottengono i costi monetari attesi che l'azienda affronta per riprofilare ogni ruota. Si riporta inoltre il risparmio percentuale rispetto l'attuale politica di manutenzione del pezzo.

MTBF =	UEC(tp*)		2	3	4	5
4549	θ	tp	1529	1798	2076	2307
2	5133	1529	0,79			
3	5094	1798		0,50		
4	5019	2076			0,38	
5	4954	2307				0,32

Tabella 38 - Valori di tp al variare di Beta e Theta

ESERCIZIO			COSTO X MANUTENZIONE	
Mesi di servizio	h di esercizio	Km di esercizio	€	
7	1476	66790	1159	84%
9	1749	79144	868	88%
10	2049	92719	781	89%
11	2307	104393	741	90%

Tabella 39 - Rapporto tra i valori calcolati dal modello e la programmazione di esercizio. Costo della manutenzione per la singola ruota e risparmio percentuale rispetto l'attuale politica. I valori sono da leggere sulla riga con riferimento a quelli proposti in Tabella 38

Come si evidenzia in Tabella 39 il risparmio di eseguire una manutenzione preventiva varia tra 84% e 90% rispetto l'attuale politica. Il fattore che maggiormente pesa in questo risultato è la gestione interna della politica di manutenzione delle ruote e il conseguente risparmio. L'attuazione dell'intervento di manutenzione in modo preventivo rispetto l'attuale politica è compensato non solo dal risparmio monetario ma anche dalla possibilità di pianificare a lungo termine gli interventi non creando conflitti tra la parte di esercizio e la parte di manutenzione

dell'impresa. I valori derivanti dal modello devono essere rapportati alla realtà dell'impresa, in particolare:

- il valore di usura β non rappresenta una quantità fisica, esso deve essere correlato alla misurazioni effettuate tramite tecnologia CALIPRI (*paragrafo 4.3.3*) nei tempi o chilometraggi prestabiliti riportati in Tabella 39;
- il valore θ non ha particolare interesse per l'azienda la quale non effettua prove di carico e misurazioni di resistenza residua sul proprio materiale. Può essere fonte di attenzione per le imprese di costruzione delle ruote per lo svolgimento di attività di ricerca.
- bisogna rapportare i valori di esercizio con l'attuale politica di manutenzione adottata in azienda, così da far coincidere la riprofilatura delle ruote con l'ingresso del veicolo in officina per un'altra manutenzione. I valori trovati dal modello sono soggetti a incertezza dovuta alle semplificazioni fatte ed inoltre sono cautelativi: non si esclude la possibilità di approssimare per eccesso o per difetto i risultati. Si decide qui di stimare i chilometri necessari per il fermo in difetto, concedendo in caso di necessità di ritardare l'intervento rimanendo nell'intervallo del tempo ottimo calcolato. Un'ulteriore aspetto è la fattibilità del giro-macchine con i risultati calcolati: come si vedrà nel *capitolo 6* data la scarsità di risorse sia di officina sia di materiale rotabile sarà necessario differenziare per ogni convoglio il periodo di manutenzione preventiva delle ruote, decidendo in quale intervallo di *CUA(t)* conviene far ricadere l'intervento. È importante perciò fornire più valori di θ e β, e relativi risultati, al fine di fornire all'officina più finestre temporali e relativi costi. Sarà compito della parte dirigente dell'azienda prendere le decisioni in base ai risultati forniti dal modello.

In base agli esiti visti in Tabella 39 e alle considerazioni appena esposte, si raccomanda la riprofilatura delle ruote durante la manutenzione R3 (di km 100000) e R1 (di km 87500), stimando l'intervento circa ogni 18 mesi solari (11 di esercizio). Si raccomanda infine l'aggiornamento periodico dei dati storici in Tabella . Dalla stessa tabella si può vedere come, nei convogli soggetti attualmente a maggiore usura (TTR1, TTR2, TTR4, TTR10, TTR11), i valori attuali di intervento stanno convergendo intorno ai valori previsti dal modello. Al contrario durante la parte iniziale della vita del materiale rotabile, i valori risultavano maggiori (fino a 300000 km) tuttavia essi (come illustrato nel *paragrafo 4.1* e *paragrafo 5.1*) non sono considerabili in campo di usura perciò si discostano maggiormente dal modello.

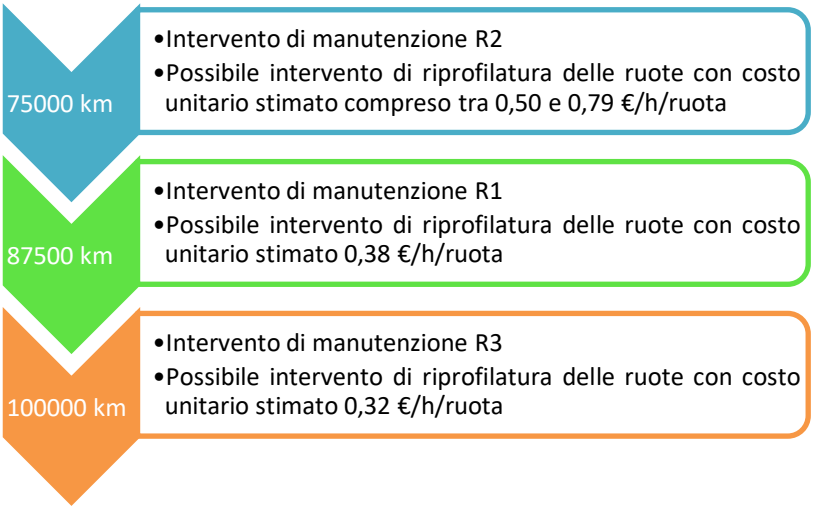


Figura 77 - Politiche di manutenzione suggerite dai risultati del modello

Si evidenzia come le politiche proposte portano a valori di costo unitario atteso minori rispetto quelle attuali, stimate a 1,62 €/h/ruota (*paragrafo 5.2.3*). Inoltre dalla Tabella 39 e Figura 76 si può constatare come il *CUA(t)* non ha un repentino incremento nell'intervallo successivo al tempo ottimo, concedendo nella pratica una flessibilità nei ritardi del giro-macchine in caso fosse necessario. Quest'ultimo fattore evidenzia ancor più come l'adozione di valori cautelativi nelle scelte aziendali in termini di manutenzione fornisca la possibilità di affrontare situazioni impreviste senza compromettere l'ottica di ottimizzazione pianificata.

6. Interfaccia tra esercizio e manutenzione: simulazione multi – scenario della programmazione 2020

Il lavoro presentato in questo capitolo ha l'obiettivo di analizzare la pianificazione dei turni del materiale rotabile. Partendo dall'analisi dell'attuale gestione del giro-macchine del Gruppo Torinese Trasporti (*paragrafo 6.1*), si vuole fornire all'impresa ferroviaria uno strumento capace di analizzare sia la gestione dei veicoli sia nella gestione delle risorse di officina. Dopo la descrizione del modello progettato e delle semplificazioni introdotte (*paragrafo 6.1.2* e *paragrafo 6.2*), verrà illustrata nel *paragrafo 6.3* la campagna multi – scenario rispetto il caso studio analizzato. In particolare, identificato uno scenario base di riferimento (denominato "scenario n.0") che illustra la situazione di progetto, vengono proposti scenari di maggiore interesse per l'azienda quali scenari imprevisti (ritardi e guasti – "scenari n. 1 – 2f") e scenari propositivi volti a migliorare le criticità riscontrate ("scenari 3 – 4"). L'obiettivo quindi è sia di quantificare l'impatto che gli eventi e le politiche di investimento hanno nello specifico caso della Ferrovia Canavesana sia di fornire uno strumento di progetto volto a supportare le decisioni dell'impresa e minimizzare i conflitti tra Esercizio e Manutenzione.

6.1. Programmazione 2020 della Ferrovia Canavesana

6.1.1. Composizioni 2020

L'impresa ferroviaria è tenuta ogni anno ad un riordino dei documenti di programmazione del servizio offerto. In particolare per l'anno 2020, la SFM1 si basa sulle seguenti procedure SGS[13] evidenziate in Tabella 40.

Programmazione del servizio	Gestione rotabili
PSGS 06 *Vestizione turni personale viaggiante*	PSGS 17 *Manutenzione rotabili*
PSGS 41 *Gestione licenza macchinisti*	PSGS 17b *Manutenzione rotabili*
PSGS 42 *Gestione certificato complementare*	PSGS 18 *Gestione libri di bordo*

Tabella 40 - PSGS di programmazione del servizio 2020 per il SFM1

[13] SGS: Sistema di Gestione della Sicurezza (*paragrafo 3.3*).

Una volta progettato il Calendario, documento nel quale l'anno di programmazione[14] viene suddiviso in periodi temporali in base alla domanda di traffico[15], viene associato ad ogni intervallo un preciso Quadro Orario e vengono messi in evidenza i chilometri percorsi, il numero di corse effettuate e ulteriori informazioni relative ai parametri di qualità dell'esercizio (Figura 78). Per l'anno 2020 il calendario è suddiviso in 4 periodi temporali: N.S. Natale, Scolastico, Non Scolastico, Agosto.

		L-V									S	
		n	KM								n	km
			Totali	AMP				TI				Tota
				Totali	psu-set	set-riv	riv-pon	Totali	a	b		
GENNAIO		990	46456,56	28346,44	9345,888	16690,21	2310,336	18110,12	18110,12	0	111	606
lunedì 1 gennaio 2018												
martedì 2 gennaio 2018												
mercoledì 3 gennaio 2018												
giovedì 4 gennaio 2018												
venerdì 5 gennaio 2018												
sabato 6 gennaio 2018												
domenica 7 gennaio 2018												
lunedì 8 gennaio 2018	16011	55	2580,92	1574,802	519,216	927,234	128,352	1006,118	1006,118	0		
martedì 9 gennaio 2018	16011	55	2580,92	1574,802	519,216	927,234	128,352	1006,118	1006,118	0		
mercoledì 10 gennaio 2018	16011	55	2580,92	1574,802	519,216	927,234	128,352	1006,118	1006,118	0		
giovedì 11 gennaio 2018	16011	55	2580,92	1574,802	519,216	927,234	128,352	1006,118	1006,118	0		
venerdì 12 gennaio 2018	16011	55	2580,92	1574,802	519,216	927,234	128,352	1006,118	1006,118	0		
sabato 13 gennaio 2018	16011										37	202
domenica 14 gennaio 2018	16011											
lunedì 15 gennaio 2018	16011	55	2580,92	1574,802	519,216	927,234	128,352	1006,118	1006,118	0		
martedì 16 gennaio 2018	16011	55	2580,92	1574,802	519,216	927,234	128,352	1006,118	1006,118	0		

Figura 78 - Calendario SMF1 (Fonte: Gruppo Torinese Trasporti)

Per ogni Quadro Orario si mette in evidenza un identificativo univoco, il dettaglio delle corse (numero identificativo unico treno, giorni di effettuazione, orario), le polimetriche cumulate e di tratta ed il dettaglio produzione corsa, ovvero i chilometri percorsi nelle rispettive suddivisioni della tratta (Figura 79).

GTT Quadro **16011 CAN** Data creazione 11/12/2016

Note:

(settimana)			326	15.733	9.512	3.395	5.475	642	6.221	6.221	-			
RIGA PRODUZIONE QUADRO	16011	55	2580,92	1574,802	519,216	927,234	128,352	1006,118	1006,118	0	37	2020,42	110	

DATI CORSA								PRODUZIONE										
								L-V								S		
								n	KM							n	km	
disp	Codice treno	Giorni	Origine		Destinazione		disp		Totali	AMP				TI			Totali	A
			Località	Ora	Località	Ora				Totali	psu-set	set-riv	riv-pon	Totali	a	b		
	4147	LS	TO-Lingotto	05.43	Chieri	06.11		1	17,276	-				17,276	17,276		1	17,276
	4196	LV	Rivarolo	11.49	TO-Lingotto	13.11		1	39,787	33,937	11,860	22,077		5,850	5,850			-
	4198	LV	Rivarolo	14.49	TO-Lingotto	16.11		1	39,787	33,937	11,860	22,077		5,850	5,850			-
	4148/4149	LS	Rivarolo	05.19	Chieri	06.41		1	57,063	33,937	11,860	22,077		23,126	23,126		1	57,063
	4150/4151	LS	Rivarolo	05.49	Chieri	07.11		1	57,063	33,937	11,860	22,077		23,126	23,126		1	57,063
	4152/4153	A	Rivarolo	06.19	Chieri	07.41		1	57,063	33,937	11,860	22,077		23,126	23,126		1	57,063

Figura 79 - Quadro orario SFM1 (Fonte: Gruppo Torinese Trasporti)

[14] Tipicamente in ambito ferroviario la programmazione dell'esercizio viene progettata dalla 2ª domenica di dicembre per circa 365 giorni.

[15] La domanda di traffico per GTT è fornita dal Capo Treno in specifiche stazioni, non si possiedono misurazioni precise ma solo stime affidate alla sensibilità del personale viaggiante.

Entrambi i documenti sono riassunti nel Programma di Esercizio, che rappresenta il documento ufficiale dell'azienda da trasmettere al gestore dell'infrastruttura ed ANSF, e con il quale si formalizza l'impegno di quest'ultima nell'erogazione del servizio (Figura 80).

PROGRAMMA DI ESERCIZIO **2020**

sfm 1 **Pont - Rivarolo - Torino - Chieri** **01**

	PRODUZIONE corse AMP	PRODUZIONE corse TI	PRODUZIONE KM Totali
ORARIO DI SERVIZIO 2019-2020	15.372	13.510	765.637,89
QUOTA ANNO 2019	*607*	*561*	*31.063,29*
QUOTA ANNO 2020	*14.765*	*12.949*	*734.574,61*
ORARIO DI SERVIZIO 2020-2021	708	645	36.099,26
INTERO ANNO 2020	15.473	13.594	770.673,86

PERIODI DI ESERCIZIO												PRODUZIONE corse		PRODUZIONE KM
Lett	Tipo	Codice	Data inizio (Compresa)	Data Fine (Compresa)	Giorni	Descrizione						AMP	TI	Totali
		ORARIO DI SERVIZIO 2019-2020				Periodo	Freq.	Vel.	4196/7	4198/9	Pont			
E	A	A2001C	domenica 15 dicembre 2019	venerdì 20 dicembre 2019	6	scolastico	30m		si	si	si	289	234	13.784,157
E	B	B12001C	sabato 21 dicembre 2019	martedì 31 dicembre 2019	11	n.s.natale	60m pom.		no	no	no	318	327	17.279,128
E	B	B12001C	mercoledì 1 gennaio 2020	lunedì 6 gennaio 2020	6	n.s.natale	60m pom.		no	no	no	150	156	8.340,246
E	A	A2001C	martedì 7 gennaio 2020	venerdì 12 giugno 2020	158	scolastico	30m		si	si	si	7.216	6.067	351.223,782
E	B	B32001C	sabato 13 giugno 2020	domenica 2 agosto 2020	51	non scol.	30m		no	no	no	1.913	1.964	103.531,585
D	C	C19001C	lunedì 3 agosto 2020	domenica 30 agosto 2020	28	agosto	60m		no	no	no	711	711	38.177,248
E	B	B32001C	lunedì 31 agosto 2020	domenica 6 settembre 2020	7	non scol.	30m		no	no	no	266	273	14.384,920
E	A	A2001C	lunedì 7 settembre 2020	sabato 12 dicembre 2020	97	scolastico	30m		si	si	si	4.509	3.778	218.916,825
		ORARIO DI SERVIZIO 2020-2021												
E	A	A2001C	domenica 13 dicembre 2020	martedì 22 dicembre 2020	10	scolastico	30m		si	si	si	450	375	21.815,412
E	B	B12001C	mercoledì 23 dicembre 2020	giovedì 31 dicembre 2020	9	n.s.natale	60m pom.		no	no	no	258	270	14.283,846

Figura 80 -Programma di esercizio SFM1, anno 2020 (Fonte: Gruppo Torinese Trasporti)

In seguito all'approvazione di questi documenti l'impresa è tenuta ad effettuare ogni giorno tutti i treni del Quadro Orario riferito alla data odierna. Ovviamente per poter effettuare i treni pianificati, occorre un adeguato numero di rotabili: si inserisce qui l'interfaccia tra l'esercizio e la manutenzione. Infatti, oltre alla normale pianificazione della manutenzione, vista nel *capitolo* 4, va considerata la normale operatività quotidiana dell'impresa e gli eventuali interventi di manutenzione correttiva. Le PSGS 17 prescrivono alcuni documenti di "comunicazione officina/DM", in particolare (Tabella 41):

Rotabili non idonei al servizio	Modulo 04 – PSGS 17
Disponibilità anticipata di rotabili	Modulo 05 – PSGS 17
Limitazioni di stato rotabili	Modulo 06 – PSGS 17

Tabella 41 - Documenti di comunicazione di interfaccia officina/DM

Tramite questi documenti ad ogni mezzo è attribuito uno stato, riportato sia nel libro di bordo del treno stesso sia in un documento apposito contenente il quadro riassuntivo dello stato del materiale rotabile (Figura 81).

STATO ROTABILI CAN

Valida dal giorno: **sabato, dicembre 28, 2019**

Data emissione ***venerdì, dicembre 27, 2019***

Tipo	*Numero*	*Stato*	*PSGS17 MOD 06 Limitazioni*	*PSGS 17 MOD 04 Data FS*	*Distanza FS*	*Descrizione / note*
ALN668	**M05**	In servizio				
ALN668	**M06**	In servizio				
ALN668	**M07**	In servizio				
TTR	**803**	I.S. con limitazioni	VIAGGIARE ACCOPPIATA			LE220: condizionatore manda sempre aria calda. **Le220 CONDIZIONATORE GUASTO (NO RICAMBI). G.S. ALE501 IN AVARIA, TRAZ. A IN AVARIA.**
TTR	**804**	In servizio				
TTR	**805**	In servizio				**ALE 501 PANTOGRAFO SBATTE NO RICAMBI.**
TTR	**806**	Fuori servizio	VIAGGIARE ACCOPPIATA CON ALE501 INTERCALATA	##########	-	**ALE 501 CABINA: CLIMA IN AVARIA. DSTM MANCANTE. T12+T15 IN ESECUZIONE**
TTR	**807**	I.S. con limitazioni	VIAGGIARE ACCOPPIATA			**G.S. ALE502 IN AVARIA. Manca ricambio**

Figura 81 - Stato del materiale rotabile SFM1 in data 28/12/2019 (Fonte: Gruppo Torinese Trasporti)

L'officina quindi, oltre ai normali interventi pianificati, opera sui treni. Ogni cambio di stato del materiale rotabile deve essere certificato attraverso due moduli (04 e 06). Schematicamente l'insorgenza di eventi non programmati riguardo un rotabile è gestita come mostrato in Figura 82. Qui viene descritto il processo che porta dall'identificazione del guasto alla decisione finale sull'uso del convoglio dopo la rilevazione dell'anomalia. In particolare si riporta In azzurro si riportano le azioni del Macchinista, in rosso le azioni del personale dell'officina, in giallo i processi decisionali, in verde la decisione finale presa dall'officina. Vengono evidenziati i moduli (04 e 06) a cura dell'officina e i rispettivi timbri che l'officina appone sul libro di bordo del treno per certificare il cambio di stato.

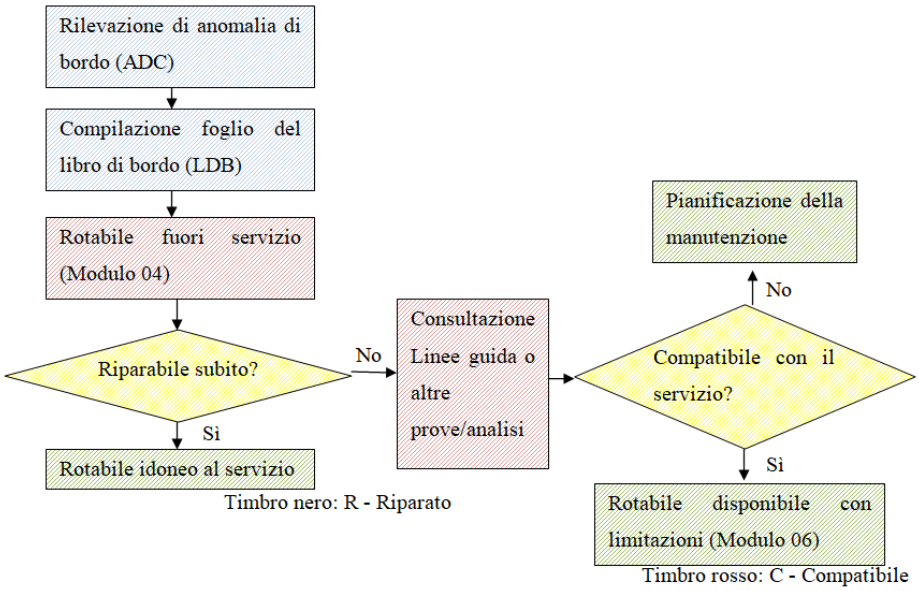


Figura 82 - Schema gestione eventi di anomalia sul materiale rotabile (elaborazione dei dati aziendali).

La disponibilità dei rotabili è aggiornata periodicamente in un documento condiviso tra le due parti nel quale ad ogni identificativo del convoglio, è associato il corrispondente stato, la manutenzione preventiva pianificata ed eventuali note. In base al numero di rotabili disponibili, il DM e l'Esercizio scelgono le composizioni da attuare. Si redige così un documento riportante il giro-macchine, ovvero l'associazione del singolo convoglio al rispettivo treno con i propri orari e percorsi. L'azienda non possiede esclusivamente un unico tipo di materiale rotabile (Ale501-Le220-Ale502) ma si avvale anche di materiale meno recente, in particolare di ETR Y0530 e di alcuni Coradia Meridian. Avendo a disposizione diverse scelte nella composizione dei treni, la direzione dell'esercizio progetta le "triplette", ovvero tre numeri che identificano rispettivamente il numero di Coradia, di TTR e di ETR necessari.

$$Codice\ tripletta: (X - Y - Z)$$

dove:

- X = numero Coradia
- Y = numero TTR (Ale501-Le220-Ale502)
- Z = numero ETR Y

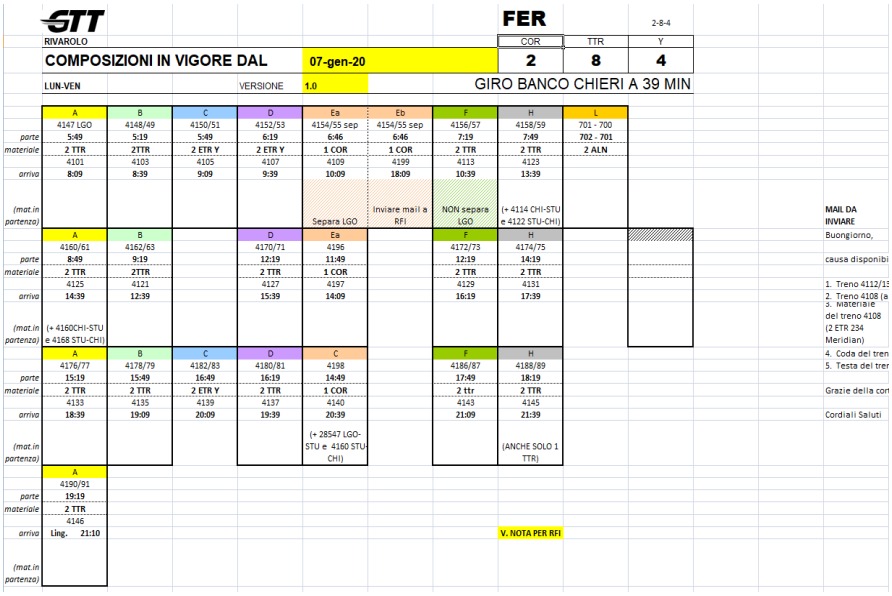
La tripletta rappresenta l'identificativo convenzionale della minima disponibilità di rotabili necessaria per poter attuare le composizioni previste. Vengono tipicamente progettate più

triplette al fine di prevedere eventuali guasti o anomalie rispetto alla pianificazione e tali triplette vengono ordinate in senso decrescente rispetto alla qualità del servizio offerto, così come mostrato in Figura 83.

				FERIALE
RIVAROLO				SFM 1
COMPOSIZIONI IN VIGORE				08-gen-20
Tipo	*Versione*	*Data*	*Chieri*	*Note*
3-8-3	1.1	08-gen-20	39	
2-10-3	1.2	08-gen-20	39	
2-8-5	1.6	08-gen-20	39	
2-8-4	1.0	07-gen-20	39	NOTA A RFI

Figura 83 - Triplette per l'esercizio sulla linea SFM1 per l'anno 2020 (Fonte: Gruppo Torinese Trasporti)

La normale tripletta per l'anno 2020 nella SFM1 è 3-8-3: 3 Coradia, 8 TTR e 3 ETR Y. Ad ogni tripletta corrisponde un documento denominato Quadro di Composizione in cui si associa il materiale alla programmazione dell'orario grafico (Figura 84).



							FER		2-8-4	
RIVAROLO							COR	TTR	Y	
COMPOSIZIONI IN VIGORE DAL				07-gen-20			2	8	4	
LUN-VEN			VERSIONE	1.0			GIRO BANCO CHIERI A 39 MIN			
	A	B	C	D	Ea	Eb	F	H	L	
	4147 LGO	4148/49	4150/51	4152/53	4154/55 sep	4154/55 sep	4156/57	4158/59	701 - 700	
parte	5:49	5:19	5:49	6:19	6:46	6:46	7:19	7:49	702 - 701	
materiale	2 TTR	2TTR	2 ETR Y	2 ETR Y	1 COR	1 COR	2 TTR	2 TTR	2 ALN	
	4101	4103	4105	4107	4109	4199	4113	4123		
arrivo	8:09	8:39	9:09	9:39	10:09	18:09	10:39	13:39		
(mat.in partenza)					Separa LGO	Inviare mail a RFI	NON separa LGO	(+ 4114 CHI-STU e 4122 STU-CHI)		MAIL DA INVIARE
	A	B		D	Ea		F	H		Buongiorno,
	4160/61	4162/63		4170/71	4196		4172/73	4174/75		
parte	8:49	9:19		12:19	11:49		12:19	14:19		causa disponibi
materiale	2 TTR	2TTR		2 TTR	1 COR		2 TTR	2 TTR		
	4125	4121		4127	4197		4129	4131		1. Treno 4112/13
arrivo	14:39	12:39		15:39	14:09		16:19	17:39		2. Treno 4108 (a
(mat.in partenza)	(+ 4160CHI-STU e 4168 STU-CHI)									3. Materiale del treno 4108 (2 ETR 234 Meridian)
	A	B	C	D	C		F	H		4. Coda del tren
	4176/77	4178/79	4182/83	4180/81	4198		4186/87	4188/89		5. Testa del trer
parte	15:19	15:49	16:49	16:19	14:49		17:49	18:19		
materiale	2 TTR	2 TTR	2 ETR Y	2 TTR	1 COR		2 ttr	2 TTR		Grazie della cor
	4133	4135	4139	4137	4140		4143	4145		
arrivo	18:39	19:09	20:09	19:39	20:39		21:09	21:39		Cordiali Saluti
(mat.in partenza)					(+ 28547 LGO-STU e 4160 STU-CHI)			(ANCHE SOLO 1 TTR)		
	A									
	4190/91									
parte	19:19									
materiale	2 TTR									
	4146									
arrivo	Ling. 21:10							V. NOTA PER RFI		
(mat.in partenza)										

Figura 84 - Quadro di composizione SFM1 anno 2020 (Fonte: Gruppo Torinese Trasporti)

Ogni colonna nel quadro di composizione raffigura la missione del treno nella giornata. Tale organizzazione, sebbene possa risultare macchinosa, permette di avere un linguaggio comune tra i diversi reparti dell'azienda, facilitando la comunicazione tra l'Esercizio e la Manutenzione ed avere la possibilità di variare il programma in modo celere e pianificato.

6.1.2. Giro – macchine proposto per la simulazione

Per poter eseguire la simulazione dei processi di officina al fine di comprendere le relative implicazioni sull'esercizio dei treni, si effettuano una serie di semplificazioni rispetto la programmazione dell'anno 2020. In particolare si adotta un unico tipo di materiale rotabile: i TTR Ale501-Le220-Ale502. La rispettiva tripletta di riferimento risulterebbe perciò 0 – 12 – 0 in quanto tutti i treni, ad eccezione di due, sono in doppia composizione (vedi *capitolo 3*). L'adozione dei soli TTR rappresenta la scelta ottimale per la quale la linea è stata originariamente progettata e viene uniformata nella qualità del servizio erogato per l'intera giornata. In ogni caso la semplificazione fornisce indicazioni utili all'azienda per trarre conclusioni sulla descrizione del fenomeno: il cadenzamento degli interventi di manutenzione, seppur diverso, possiede tolleranze che rendono le manutenzioni programmate dei tre tipi di rotabile non eccessivamente diverse in termini chilometrici e, ovviamente, l'adozione di materiale diverso non comporta variazioni di chilometraggi percorsi in quanto la linea rimane la medesima. L'elemento di maggiore variazione rispetto alla situazione reale è rappresentato dalle tempistiche di manutenzione, distacco che si può colmare attraverso l'implementazione dello scenario n.1 proposto successivamente. Innanzitutto distinguiamo quattro stati che un treno può assumere:

- *Stato 1 - Esercizio*: il convoglio è idoneo all'esercizio ed è utilizzato nella settimana corrente per la composizione di un treno.
- *Stato 2 - Parcheggio*: il convoglio è idoneo all'esercizio ma non è utilizzato per l'effettuazione delle corse. Il materiale è custodito in un apposito piazzale e risulta utile qualora servisse sostituire il materiale in esercizio che subisce un fermo per guasto.
- *Stato 3 - Ricovero*: il convoglio non è idoneo all'esercizio ed è fermo in un piazzale antistante l'officina in attesa della disponibilità di risorse attualmente sature o in attesa di pezzi di ricambio non disponibili in officina.
- *Stato 4 - Manutenzione*: il convoglio occupa una risorsa in officina per eseguire la manutenzione preventiva o la riparazione di un guasto.

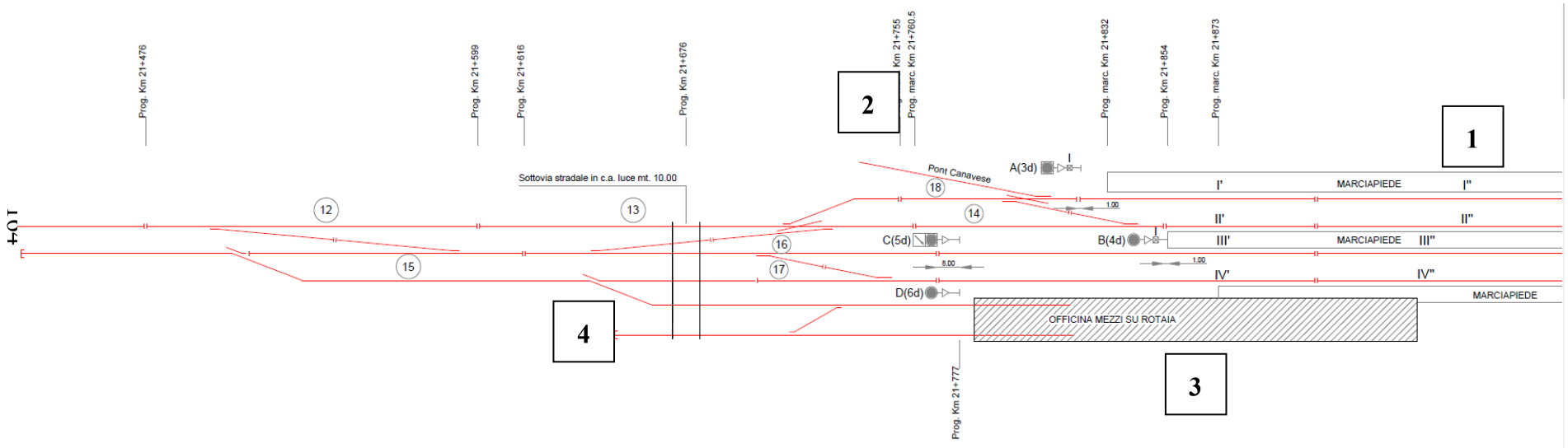


Figura 85 - Piantina complesso di Rivarolo Canavese: 1) i binari della stazione sono riservati ai convogli in esercizio; 2) il parcheggio risulta distaccata dai fabbricati in uno spazio idoneo; 3) le operazioni di manutenzione sono svolte interamente sotto il fabbricato coperto adiacente alla stazione (vedi *allegato C* per la piantina dettagliata dell'officina)**; 4) il ricovero è effettuato in appositi binari antistanti la stazione** (Fonte: Gruppo Torinese Trasporti)

Il giro-macchine è concepito cercando di perseguire i seguenti obiettivi:

I. garantire la singola composizione per il treno 4 ed il treno 7, la doppia composizione per i restanti (come spiegato nel *capitolo 3*);
II. attribuire ad ogni convoglio la distanza percorsa al fine di maturare il chilometraggio in cui eseguire l'intervento di manutenzione. Si decide di far coincidere l'intervento nell'intervallo distanziometrico [*0,95d* ; *d*] in accordo con quanto visto nel *capitolo 4* e al fine di avere una condizione a favore di sicurezza nei confronti di eventuali imprevisti nella pianificazione;
III. avere sempre a disposizione almeno 2 convogli a disposizione nel parcheggio per sopperire all'eventuale necessità di sostituzione di materiale rotabile;
IV. il ricovero, caratterizzante la condizione più penalizzante per l'intera gestione del processo, deve durare il minor tempo possibile;
V. il materiale in manutenzione, anche se necessita di pochi giorni per l'esecuzione dell'intervento, è considerato in stato di fermo per l'intera settimana al fine di non avere un programma troppo rigido nei confronti delle scadenze progettate. In tal modo il materiale in uscita dall'officina verrà predisposto nel parcheggio, aumentando il numero di materiale rotabile disponibile in caso di necessità. Complessivamente la condizione sopra illustrata risulta a favore di sicurezza;
VI. cercare un'equa distribuzione del lavoro di officina tra le settimane, eventualmente ricorrendo al ricovero o anticipando/posticipando il fermo nel rispetto dei limiti previsti.
VII. ricercare le scadenze per la riprofilatura delle ruote come indicato nel *capitolo 5*, differenziando tra i 100000 km e i 87500 km circa, al fine di non creare fermi e colli di bottiglia troppo penalizzanti in termini di risorse e di tempo.

Al fine di studiare in maniera approfondita il processo e apportare dei miglioramenti alla gestione del materiale rotabile, è stato simulato il macro processo relativo al giro-macchine per l'anno 2020 (dal 30/12/2019 al 03/01/2021) (Figura 86 A e B). L'approccio simulativo verrà descritto nel *paragrafo 6.2.2*, gli scenari analizzati e i risultati ottenuti saranno descritti nel *paragrafo 6.3*.

TTR1		TTR2		TTR3		TTR4		TTR5		TTR6		TTR7		TTR8		TTR9		TTR10	
86182	Treno 2	74110	Treno 2	Fermo parcheggio		Fermo parcheggio		Fermo parcheggio		Fermo parcheggio		R1 -1 GG		R3 - 2 GG		64535	Treno 5	64535	Treno 5
R1 - 1 GG		R2 - 1 GG						65662	Treno 2	53364	Treno 2	Fermo parcheggio		Fermo parcheggio		65790		65790	
Fermo parcheggio		Fermo parcheggio						68741		56444						67045		67045	
89260	Treno 1	77188	Treno 1					71821		59523						68299		68299	
92338		80266						74900		62603						69554		69554	
95416		83344						R2 - 1 GG		R1 - 1 GG		65191	Treno 2	52668	Treno 2	70808		70808	
98493		86421						Fermo parcheggio		Fermo parcheggio		68271		55748		72063		72063	
R3 - 2 GG		R1 - 1 GG		77435		77435		77978		65680		71350		58827		73317		73317	
Tornitura		Fermo parcheggio		78918		78918		81056	Treno 1	68758	Treno 1	74430		61907		74572		74572	
Fermo parcheggio				80401	Treno 3	80401	Treno 3	84134		71836		R2 - 1 GG		R1 - 1 GG		75827		75827	
101571	Treno 1	89499	Treno 1	81883		81883		87212		74914		Fermo parcheggio		Fermo parcheggio		R2 - 1 GG		R2 - 1 GG	
104649		92577		83366		83366		R1 - 1 GG		R2 - 1 GG						Fermo parcheggio		Fermo parcheggio	
107727		95655		84849		84849		Fermo parcheggio		Fermo parcheggio		77509	Treno 2	64986	Treno 2				
110805		98733		86331		86331						80588		68065					
113883		101811		87814		87814						83668		71145					
R1 - 1 GG		R3 - 2 GG		R1 - 1 GG		R1 - 1 GG		88694		76397		86747		74224					
Fermo parcheggio		Tornitura		90893	Treno 2	90893	Treno 2	90177		77880		R1 - 1 GG		R2 - 1 GG		77081		77081	
				93973		93973		91660		79362		Fermo parcheggio		Fermo parcheggio		78336		78336	
		104225		97052		97052		93142	Treno 3	80845	Treno 3					79590		79590	
		106640	Treno 7	100132		100132		94625		82328						80845	Treno 6	80845	Treno 6
		109054		R3 - 2 GG		R3 - 2 GG		96108		83810		89827	Treno 2	77304	Treno 2	82099		82099	
		111469		Tornitura		Fermo ricovero		97590		85293		92906		80383		83354		83354	
		113883				Tornitura		99073		86776		95985		83463		84609		84609	
		R1 - 1 GG		Fermo parcheggio		Fermo parcheggio		R3 - 2 GG		R1 - 1 GG		99065		86542		85863		85863	
		Fermo parcheggio		101386		101386		Tornitura		89190		R3 - 2 GG		R1 - 1 GG		87118		87118	
116961	Treno 1	116961	Treno 1	102641		102641				91604		Tornitura		Fermo parcheggio		R1 - 1 GG		R1 - 1 GG	
120039		120039		103895		103895				94019		Fermo parcheggio				90196	Treno 1	90196	Treno 1
123117		123117		105150		105150		Fermo parcheggio		96433	Treno 7					93274		93274	
126195		126195		106405	Treno 6	106405	Treno 6			98848		102144		89621		96352		96352	
Fermo ricovero		Fermo ricovero		107659		107659				101262		105224	Treno 2	92701	Treno 2	99429		99429	
R2 - 1 GG		R2 - 1 GG		108914		108914		100328		R3 - 2 GG		108303		95780		R3 - 2 GG		Tornitura	
Fermo parcheggio		Fermo parcheggio		110168		110168		101582		Fermo parcheggio		111382		98860		Tornitura		R3 - 2 GG	
				111423		111423		102837				114462		101939				100912	
129273	Treno 1	129273	Treno 1	112677		112677		104091		103676		R1 - 1 GG		R3 - 2 GG		102509		102395	
132350		132350		R1 - 1 GG		R1 - 1 GG		105346	Treno 5	106091	Treno 7	Fermo parcheggio		Tornitura		105588	Treno 2	103877	Treno 3
135428		135428		Fermo parcheggio		Fermo parcheggio		106600		108505		117541		Fermo parcheggio		108668		105360	
138506		138506		115755		115755		107855		110920		120621	Treno 2			111747		106843	
R1 - 1 GG		R1 - 1 GG		118833	Treno 1	118833	Treno 1	109110		113334		123700		105018		114826		108325	
Fermo parcheggio		Fermo parcheggio		121911		121911		110364		R1 - 1 GG		126779		108098	Treno 2	R1 - 1 GG		109808	
				124989		124989		111619		Tornitura		R2 - 1 GG		111177		Fermo parcheggio		111291	
141584	Treno 1	141584	Treno 1	R2 - 1 GG		R2 - 1 GG		R1 - 1 GG				Fermo parcheggio		114257		117906	Treno 2	R1 - 1 GG	
144662		144662		Fermo parcheggio		Fermo parcheggio								117336		120985		Fermo parcheggio	
147740		147740						Fermo parcheggio		Fermo parcheggio		129859		R1 - 1 GG		124065			
150818		150818		126244		126244						132938	Treno 2			127144			
R3 - 2 GG		R3 - 2 GG		127498		127498						136018		Fermo parcheggio		R2 - 1 GG		114370	
Fermo parcheggio		Fermo parcheggio		128753	Treno 6	128753	Treno 6	110592		114817		139097				Fermo parcheggio		117450	Treno 2
				130007		130007		112075	Treno 3	116299	Treno 3	142176				127144		120529	
				131262		131262		113558		117782		R1 - 1 GG		120415				123608	
				132516		132516		115040		119265						130223	Treno 2	R2 - 1 GG	
				133771		133771		116523		120747		Fermo parcheggio		123495	Treno 2	133303			
														126574				Fermo parcheggio	
														129654		136382			

Figura 86A - Giro Macchine per l'anno 2020 (dal 30/12/2019): in ogni riga, rappresentante una settimana, si leggono i chilometri accumulati dal mezzo o l'intervento richiesto con la rispettiva durata o la tipologia di fermo (ricovero o parcheggio)

TTR11		TTR12		TTR13		TTR14		TTR15		TTR16		TTR17		TTR18		TTR19		TTR20	
65350	Treno 1	65350	Treno 1	77591	Treno 6	54951	Treno 6	Fermo parcheggio		R1 - 1 GG		59706	Treno 4	64438	Treno 7	64077	Treno 3	63852	Treno 3
68428		68428		78846		56206				Fermo parcheggio		61756		66853		65560		65334	
71506		71506		80101		57460		63842	Treno 4			R1 - 1 GG		69267		67042		66817	
74584		74584		81355		58715		65892						71682		68525		68300	
R2 - 1 GG		R2 - 1 GG		82610		59970		67941				Fermo parcheggio		74096		70008		69782	
Fermo parcheggio		Fermo parcheggio		83864		61224		69991		63959	Treno 7			R2 - 1 GG		71490		71265	
				85119		62479		72040		66373				Fermo parcheggio		72973		72748	
75839	Treno 6	75839	Treno 6	R1 - 1 GG		R1 - 1 GG		74090		68788		63805	Treno 4			74456		74230	
77093		77093		Tornitura		Fermo parcheggio		R2 - 1 GG		71202		65855				R2 - 1 GG		R2 - 1 GG	
78348		78348		Fermo parcheggio						73616		67904		76510	Treno 7	77535	Treno 2	77310	Treno 2
79602		79602		86373	Treno 5	63733	Treno 5	Fermo parcheggio		R2 - 1 GG		69954		78925		80615		80389	
80857		80857		87628		64988				Fermo parcheggio		72003		81339		83694		83468	
82111		82111		88883		66242						74053		83754		86773		86548	
83366		83366		90137		67497						R2 - 1 GG		86168		R1 - 1 GG		R1 - 1 GG	
84621		84621		91392		68752		76140								Tornitura		Fermo ricovero	
85875		85875		92646		70006		78189	Treno 4	76031	Treno 7			R1 - 1 GG				Tornitura	
87130		87130		93901		71261		80239		78445				Tornitura		Fermo parcheggio			
Fermo ricovero		Fermo ricovero		95155		72515		82288		80859		Fermo parcheggio				89851	Treno 1	89626	Treno 1
R1 - 1 GG		R1 - 1 GG		96410		73770		84338		83274						92929		92704	
Fermo parcheggio		Tornitura		97665		75024		86387		85688						96007		95782	
				98919		76279		R1 - 1 GG		R1 - 1 GG		76103	Treno 4	Fermo parcheggio		99085		98860	
88384	Treno 5	88384	Treno 5	R3 - 2 GG		Fermo ricovero		Fermo parcheggio		Fermo parcheggio		78152				102163		101937	
89639		89639		Fermo parcheggio				89465	Treno 1	88766	Treno 1	80202				R3 - 2 GG		R3 - 2 GG	
90893		90893				R2 - 1 GG		92543		91844		82251				Fermo parcheggio		Fermo parcheggio	
92148		92148		100402	Treno 3	Fermo parcheggio		95621		94922		84301		87651	Treno 3	105242	Treno 2	105017	Treno 2
93403		93403		101884				98699		98000		86350		89133		108322		108096	
94657		94657		103367		78329	Treno 4	101777		101078		R1 - 1 GG		90616		111401		111176	
95912		95912		104850		80378		R3 - 2 GG		R3 - 2 GG				92099		114481		114255	
97166		97166		106333		82428		Tornitura		Fermo ricovero		Fermo parcheggio		93581		R1 - 1 GG		R1 - 1 GG	
98421		98421		107815		84477				Tornitura				95064		Fermo parcheggio		Fermo parcheggio	
99675		99675		109298		86527		Fermo parcheggio						96547		117558	Treno 1	117333	Treno 1
100930		100930		110781		R1 - 1 GG		104191		Fermo parcheggio		88400		98029		120636		120411	
Fermo ricovero		Fermo ricovero		112263		87781		106606	Treno 7			90450		99512		123714		123489	
R3 - 2 GG		R3 - 2 GG		Fermo ricovero		89036		109020		102560		92499	Treno 4	R3 - 2 GG		126792		126567	
Tornitura		Fermo parcheggio		R1 - 1 GG		90291		111435		104043		94549		102591	Treno 2	R2 - 1 GG		R2 - 1 GG	
				Fermo parcheggio		91545		R1 - 1 GG		105526		96598		105671		Fermo parcheggio		Fermo parcheggio	
102185	Treno 6	102185	Treno 6			92800	Treno 5	Fermo parcheggio		107008	Treno 3	98648		108750					
103439		103439				94054				108491		100698		Fermo parcheggio					
104694		104694				95309				109974		Tornitura		110800	Treno 4				
105948		105948				96563				111456				112849					
107203		107203		114313	Treno 4	97818		113849		112939		R3 - 2 GG		R1 - 1 GG					
108457		108457		Fermo parcheggio		99073		116263	Treno 7	R1 - 1 GG						128275	Treno 3	128049	Treno 3
109712		109712		115567	Treno 5	100327		118678		Fermo parcheggio		Fermo parcheggio		114899	Treno 4	129758		129532	
110967		110967		116822		R3 - 2 GG		121092		114194				116949		131240		131015	
112221		112221		118077		Tornitura		123507		115448	Treno 5	102747		118998		132723		132497	
113476		113476		119331				125921		116703		104797	Treno 4	121048		134206		133980	
R1 - 1 GG		R1 - 1 GG		120586				R2 - 1 GG		117957		106846		Fermo parcheggio		135688		135463	
116554	Treno 1	116554	Treno 1	121840		Fermo parcheggio				119212		108896		123462	Treno 7	137171		136945	
119632		119632		123095				Fermo parcheggio		120467		110945		125876		R1 - 1 GG		R1 - 1 GG	
122709		122709		124349						121721		112995		128291		Fermo parcheggio		Fermo parcheggio	
125787		125787		125604						122976		115045		130705					
R2 - 1 GG		R2 - 1 GG		126859		102741	Treno 7			124230		R1 - 1 GG		133120		140249	Treno 1	140023	Treno 1
Fermo parcheggio		Fermo parcheggio		128113		105156				125485		Fermo parcheggio		135534		143327		143101	
														137948					

Figura 86B - Giro Macchine per l'anno 2020 (dal 30/12/2019): in ogni riga, rappresentante una settimana, si leggono i chilometri accumulati dal mezzo o l'intervento richiesto con la rispettiva durata o la tipologia di fermo (ricovero o parcheggio)

6.2. La simulazione

La simulazione è utilizzata al fine di riprodurre il comportamento di un sistema reale quando esso è troppo complicato per essere studiato nei suoi singoli passaggi e relazioni; essa riveste un ruolo chiave nel valutare gli elementi di incertezza all'interno di sistemi complessi e sperimentare situazioni di cui è impossibile eseguire test direttamente sul campo. Per ottenere risultati utili, è necessario conoscere in maniera esaustiva i processi che devono essere simulati, al fine di elaborare un modello di simulazione che possa replicarli in maniera fedele. Bisogna tenere in considerazione che la simulazione non fornisce risposte "esatte" (come invece consentito dagli approcci di ottimizzazione), bensì si propone di descrivere il comportamento del sistema al variare di differenti scenari e di effettuare analisi di tipo "what-if". Il modello perciò deve essere sufficientemente completo in modo tenere in considerazione gli aspetti essenziali del processo, semplificando gli aspetti non essenziali e trascurando quelli non necessari. La semplificazione deve essere accompagnata dalla corretta descrizione dei limiti del modello, evidenziando quali sono stati gli elementi soggetti ad approssimazioni rispetto alla situazione reale.

Lo studio degli output della simulazione riveste un ruolo di primaria importanza; spesso si tratta di un processo laborioso in cui bisogna tenere a mente i gradi di semplificazione introdotti nel modello e interpretarei risultati alla luce di una analisi critica della situazione reale. I principali elementi del modello sono:

- Variabili: in ogni istante di tempo il modello è descritto dalle sue variabili. Ad esempio, il numero di entità presenti all'interno del processo in un determinato istante di tempo.
- Entità e attributi: esse sono il soggetto del sistema. Ogni singolo elemento che attraversa il modello (ad esempio un utente) rappresenta un'entità ed è descritto da attributi ai quali si assegnano valori precisi a seconda delle caratteristiche dell'entità. Ad esempio, per l'entità "utente" si può assegnare l'attributo "orario di arrivo". Le entità sono raggruppabili in classi che condividono uno o più attributi.
- Eventi, che possono modificare il valore delle variabili di stato.
- Risorse, di cui l'entità si possono servire. Se una risorsa è libera può essere utilizzata dall'entità per il tempo necessario; se invece risulta occupata, l'entità verrà inserita in coda fino alla disponibilità della risorsa.

Esistono diversi tipi di simulazione (Balsamo, 2007):

- emulazione: simulazione che coinvolge componenti del sistema hardware e firmware;
- metodo Montecarlo: utilizzato per modellare fenomeni che non cambiano nel tempo. Richiede una generazione di numeri pseudo - casuali che seguono la distribuzione di probabilità che si suppone abbia il fenomeno da indagare;
- simulazione Trace-driven: simulazione fondata su una sequenza di eventi ordinati nel tempo e registrati dal sistema reale;
- simulazione ad eventi discreti: simulazione che usa un modello del sistema a tempo discreto in cui le variabili di stato cambiano solo in corrispondenza di eventi discreti, determinati a loro volta da attività e ritardi.

Date le caratteristiche del problema oggetto di studio, la scelta operata in questo lavoro di tesi è quella di un modello ad eventi discreti tramite il quale viene replicato il comportamento del sistema evidenziato in Figura 87. In particolare, come verrà descritto nel *paragrafo 6.2.2*, il modello si occuperà di simulare gli eventi a partire da quando i treni effettuano una operazione di manovra dal binario di manovra all'area di officina, comprendente la zona di ricovero e le vie di manutenzione. Le parti relative all'organizzazione della stazione ferroviaria, alle movimentazioni per le composizioni dei treni e la gestione del parcheggio sono gestite da alcuni fogli di calcolo Excel.

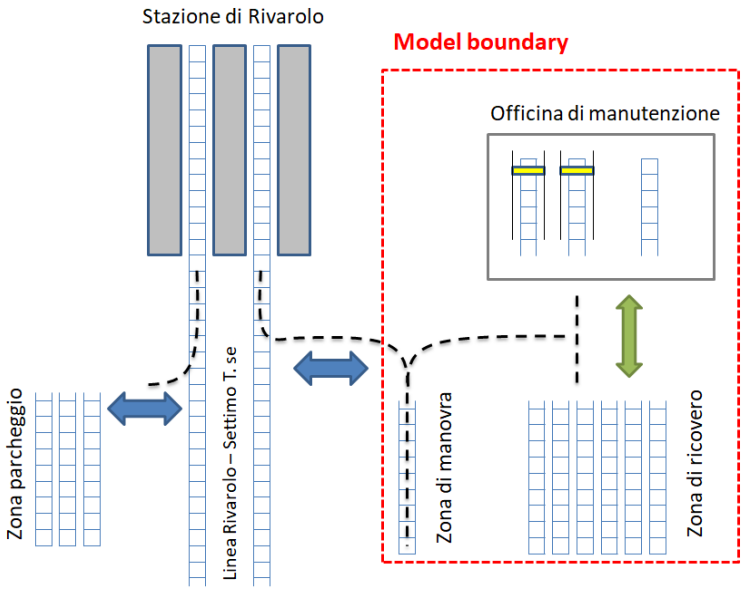


Figura 87 - Perimetro di riferimento della simulazione

Gli istanti temporali possono riferirsi a scale orarie, giornaliere o annuali. In particolare il valore temporale di riferimento utilizzato nel modello proposto è su base giornaliera. Lo schema dello studio di simulazione si articola nelle seguenti fasi (Bosso, 2016) (Figura 88):

1. Analisi del problema, in cui sono studiati i processi con i relativi tempi e costi, compresi i fini dello studio e i principali KPIs[16] di interesse. A tal fine è utile sviluppare una mappa concettuale nel quale si mettono in evidenza tutti i processi logici e le domande che consentono di descrivere il sistema reale. Per il caso in esame è proposto uno schema in Figura .
2. Formulazione del problema/mappatura dei processi: comprendere i processi e le relative distribuzioni di probabilità a partire dai dati empirici a disposizione.
3. Elaborazione del modello: il problema in esame deve essere rappresentato utilizzando il linguaggio simulativo, di solito facendo uso di un apposito software di simulazione,. quale ad esempio ARENA, WITNESS o ANYLOGIC. Tali software consentono di costruire modelli di simulazione senza bisogno di conoscere linguaggi di programmazione specifici. Il modello può essere interfacciato con fogli elettronici di calcolo (ad esempio Excel) sia per l'inserimento di input sia per raccogliere ed elaborare gli output della simulazione.
4. Validazione: si deve verificare il corretto funzionamento del modello di simulazione e verificare che esso replichi fedelmente il funzionamento reale, ovvero che gli output siano coerenti con la realtà.
5. Progettazione della campagna di simulazione: una volta validato il modello, è necessario progettare una adeguata campagna simulativa, ovvero decidere quali esperimenti effettuare
6. Esecuzione della campagna di simulazione: si procede con l'esecuzione degli scenari decisi e con l'interpretazione degli output ottenuti.
7. Conclusioni: dopo l'interpretazione degli output e il confronto tra i risultati ottenuti, si traggono le conclusioni in accordo con gli obiettivi prefissati nella fase 1.

[16] KPIs: Key Performance Indicators.

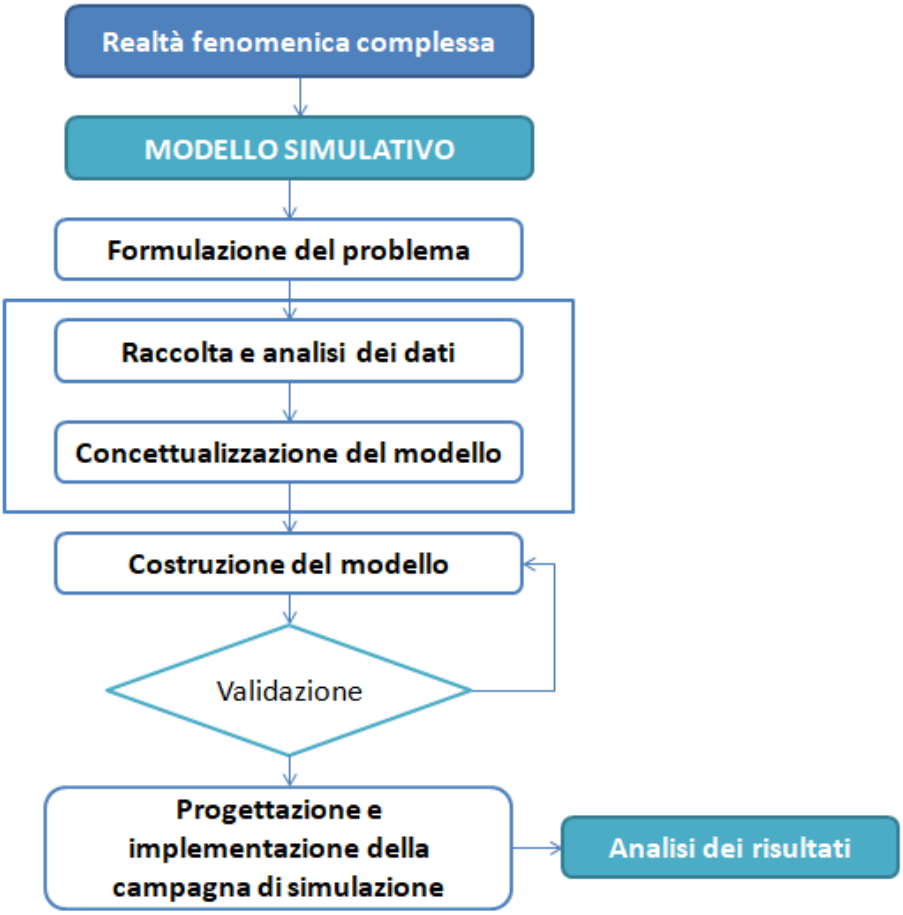


Figura 88 - I passi della simulazione

Nella successiva Figura si illustra l'analisi del problema svolta. Dopo la generazione delle entità da parte del software, ogni giorno si determina lo stato del convoglio (*paragrafo 6.1.2*). I treni già in manutenzione continuano il loro iter di interventi, qualora tutte le vie dell'officina siano occupate il treno rimarrà in attesa nella zona di ricovero. Se il treno invece è operativo in linea si incrementano i chilometri percorsi per valutare la successiva settimana se ha maturato la distanza sufficiente per la manutenzione. I convogli in manutenzione continuano a utilizzare la risorsa assegnata finché non hanno maturato la durata prevista per l'intervento. Il ciclo si ripete fino alla conclusione del periodo previsto per la simulazione.

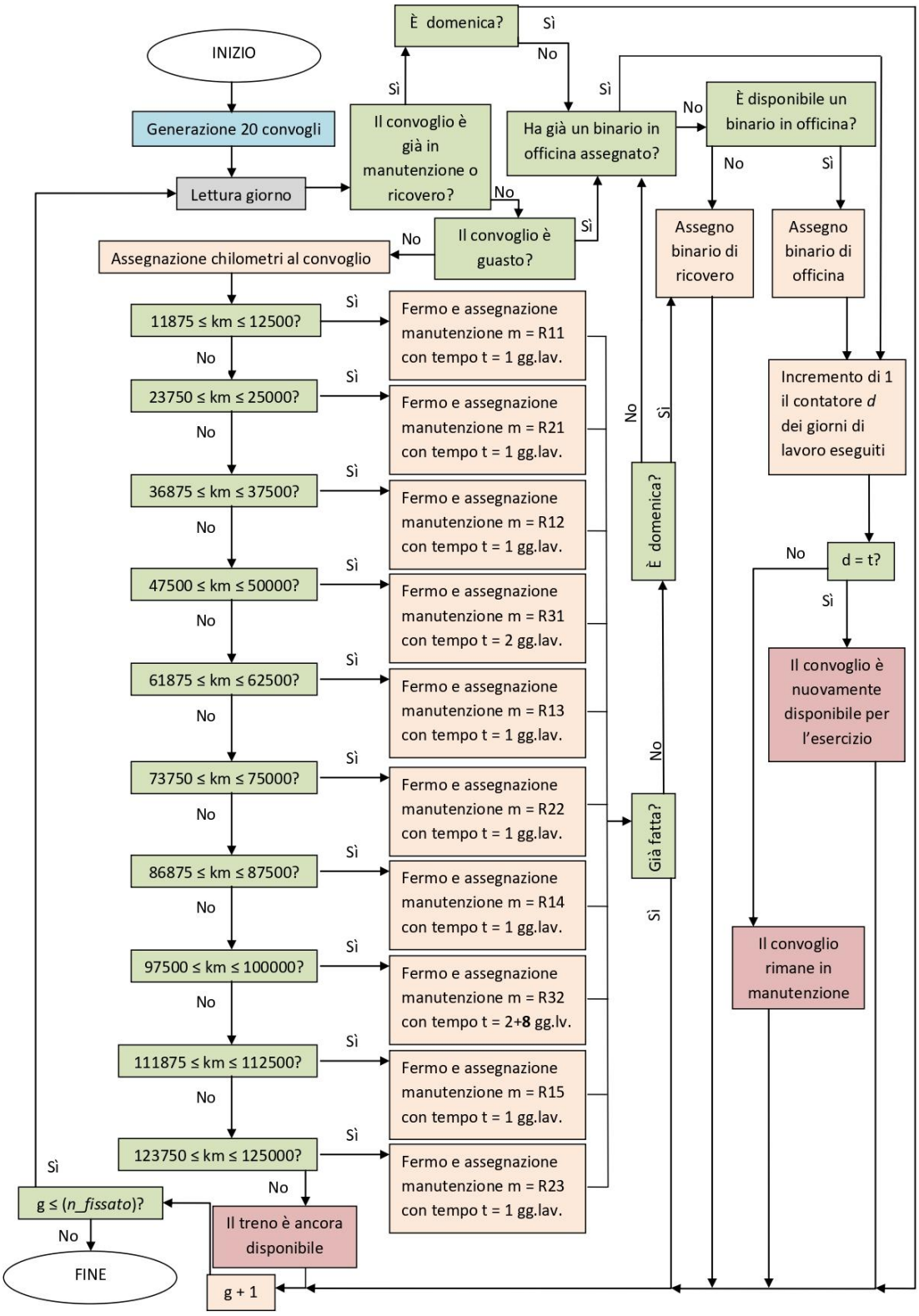


Figura 89 - Diagramma di flusso: relazione tra esercizio SFM1 e manutenzione presso l'officina di Rivarolo Canavese

Stato dell'arte

In letteratura sono presenti numerosi studi nel settore ferroviario che evidenziano i vantaggi e gli svantaggi di una politica manutentiva rispetto un'altra (Mishalani, 2009), (Joranovic, 2015) e (Zhenliang, 2012). L'usura dei componenti non avviene in maniera simultanea ma differenziata nel tempo in base alle condizioni operative. Il rigoroso adempimento della manutenzione di ogni componente senza considerare le esigenze di altri componenti possono portare a un numero molto elevato degli arresti del materiale rotabile e, pertanto, invalidare il livello di servizio garantito ai passeggeri. È quindi necessario trovare un equilibrio tra questi due aspetti, accettando diversi tolleranze in termini di usura dei singoli componenti e, quindi, raggruppando il maggior numero possibile di interventi la stessa macchina di manutenzione in basso (Bababeik, 2019). L'obiettivo di questo lavoro è pianificare efficacemente i turni di manutenzione del materiale rotabile e delle riserve al fine di soddisfare le esigenze operative. A tal fine è stato implementato il modello di simulazione (usando l'Arena software correttamente interfacciato con alcuni fogli di lavoro), in grado di realizzare scenari what-if e studiare l'effetto di politiche di investimento ed eventi inattesi. La simulazione ad eventi discreti è stata già utilizzata nel contesto della manutenzione ferroviaria, come ad esempio in (Yasmina, 2019) ma in una prospettiva a breve termine sul verificarsi singolo eventi. In effetti, come in (Sarah, 2012), questo lavoro focalizza l'attenzione sulla pianificazione della manutenzione a più lungo termine, cercando di coinvolgere il esigenze di tutte le parti interessate in questa organizzazione.

6.2.1. Il software Arena

Arena è il software scelto per la simulazione ad eventi discreti. Esso è applicabile a diversi contesti quali schedulazione, logistica, servizi, trasporti, sanità, telecomunicazioni e sistemi di produzione. E' un software è intuitivo e completo, che consente di costruire agevolmente modelli di simulazione che rappresentano sistemi reali di diversa complessità, fornendo indicazioni sulle prestazioni del sistema. I processi e le attività del modello vengono rappresentate attraverso opportuni blocchi che permettono di non dover utilizzare un linguaggio di programmazione ma si appoggiano al linguaggio SIMAN (SImulation Modeling ANalysis) che viene generato automaticamente da Arena. L'approccio di Arena è di tipo *One-Step*: il modello assume le sembianze di un flowchart e perciò non descrive solamente il processo ma fornisce una visione logica di insieme del problema in esame. Inserendo un modulo nella finestra di progetto è possibile modificare le sue proprietà. I moduli si classificano in due tipologie (Uguenti, 2017):

- *Flowchart modules*, che svolgono funzioni determinate per ciascun modulo. Si differenziano per colore e forma. Collegati tra loro, tali moduli rappresentano il sistema dinamicamente.
- *Data modules*, che consentono di modificare gli elementi che compongono il modello. Essi forniscono una descrizione statica del problema.

I due moduli sono contenuti in due spazi diversi del *front-end* del programma, rispettivamente nella *Flowchart View* e nella *Spreadsheet View* (Figura 90):

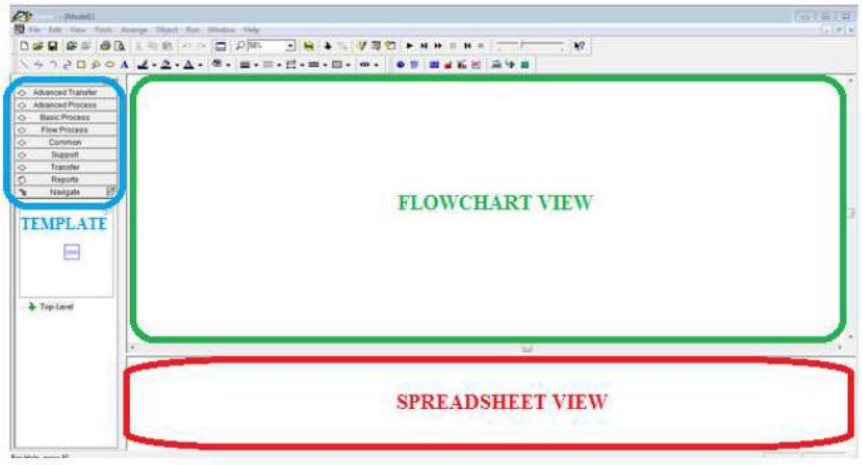


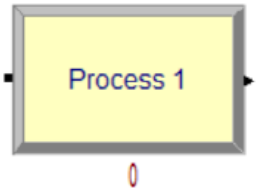
Figura 90 - Finestra di Arena (Fonte: Uguenti, 2017)

I principali moduli Flow-Chart di Arena sono (Bosso, 2016 e Rockwell Aut. Inc, 2019):

- *Create*

Viene utilizzato per generare un'entità e corrisponde con l'ingresso nel sistema della stessa entità. In tale blocco vanno specificati:
  - *Name*: identificatore del modulo;
  - *Entity Type*: tipo di entità generata;
  - *Type*: modalità di generazione (distribuzione dei tempi di arrivo);
  - *Entities per Arrival*: numerosità del gruppo generato;
  - *Max Arrivals*: numero massimo di entità generate;
  - *First Creation*: istante di arrivo della prima entità.

- *Process*

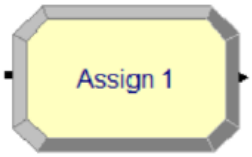


Descrive l'attività svolta dalle entità che lo attraversano. Si specifica:
  - *Name*: identificatore del modulo;
  - *Type*: standard Model o subModel;
  - *Action*: tipo di processo:
    - *Delay*: non è richiesta nessuna risorsa ma è necessario un tempo di processa mento;

- *Seize Delay*: è richiesto sia un tempo di processamento sia una risorsa ma non viene rilasciata;
- *Seize Delay Release*: è richiesto un tempo di processamento nel quale una risorsa che è allocata e rilasciata;
- *Delay Release*: è richiesto un tempo di processamento nel quale una risorsa, precedentemente allocata, è rilasciata;

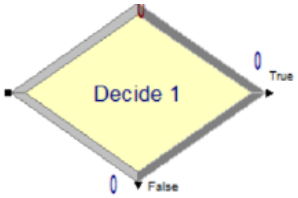
- *Priority*: livello di priorità delle entità;
- *Resources*: risorsa usata;
- *Delay Type*: distribuzione per la generazione dei tempi di processamento;
- *Units*: unità di misura del tempo.

- *Assign*



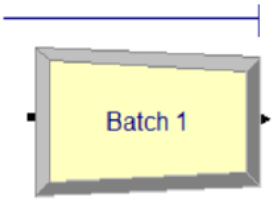
Assegnazione all'entità che lo attraversa. Si specifica:
- *Name*: identificativo;
- *Assignments*: specifica l'assegnazione da fare.

- *Decide*



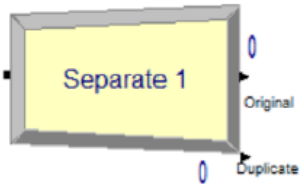
Utile per i processi "what-if", instrada l'entità su uno specifico ramo di uscita. Si specifica:
- *Name*: identificativo;
- *Type*: decisione su condizione.

- *Batch*



Le entità attendono in coda fino al completamento di un lotto il quale uscirà dal modulo come un'unica entità. Si specifica:
- *Name*: identificativo;
- *Type*: tipo di raggruppamento
- *Size*: dimensione;
- *Save Criterion*: criterio di assegnazione dell'attributo;
- *Rule*: regola di batching.

- *Separate*



Permette la duplicazione di un'entità o la separazione di un lotto. Si specifica:
- *Name*: identificativo;
- *Type*: tipo di separazione
- *Percent costo of duplicate*: tempi e costi delle entità duplicate;
- *# of duplicates*: numero dei duplicati creati.

- *Hold*

Trattiene entità successivamente rilasciate. Si specifica:

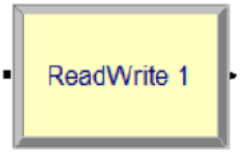
- *Name*: identificativo;
- *Type*: logica secondo cui le entità sono rilasciate (Scan for Condition; Wait for Signal);

- *Dispose*

  Rappresenta la fine del processo e la distruzione dell'entità.

- *ReadWrite*

  Legge un file remoto (ad esempio Excel) per la lettura della schedulazione riguardante le entità generate. Scrive sul corrispettivo attributo i valori letti. Si specifica:



  - *Name*: identificativo;
  - *Type*: tipo di file che Arena deve leggere. Esso è abbinato al modulo DATA File, rispetto al quale deve corrispondere il nome;
  - *Recordset ID*: identificativo che deve corrispondere al DATA File, al quale è associato il nome delle celle Excel;
  - *Assignment*: definizione degli attributi ai quali sono assegnati i valori letti da Excel.

I principali moduli Data sono (Bosso, 2016):

- *Entity*: definisce le entità e i costi;
- *Queue*: definisce le code e la loro gestione (FIFO, LIFO);
- *Resource*: definisce le risorse e la loro capacità;
- *Variable*: definsce le variabili del modello (vettori o matrici);
- *File*: abbinato al modulo ReadWrite, si definisce il nome del file, il tipo e il percorso. Si specifica inoltre il Recordsets (ovvero il nome delle celle Excel).

6.2.2. Progettazione del modello di simulazione

In tale paragrafo, viene descritto il modello di simulazione implementato in Arena per simulare il percorso effettuato dai treni dell'azienda all'interno dell'officina presso l'impianto di Rivarolo Canavese al fine di rispettare la schedulazione prevista per il giro-macchine descritto nel *paragrafo 6.1.2*. Data la dimensione estesa, verrà successivamente descritto il modello dividendolo nei principali step logici.

Come mostrato in Figura 91, vengono analizzate le attività svolte dalle due principali funzioni aziendali coinvolte l'Esercizio e la Manutenzione. Le operazioni dell'Esercizio (descritte nel *capitoli 2* e *3*) comprendono le decisioni riguardanti la composizione dei treni, l'aggiornamento del chilometraggio percorso, l'effettuazione delle corse, l'invio dei convogli

in officina e il computo del materiale rotabile disponibile. La manutenzione si occupa invece della schedulazione degli interventi pianificabili, l'organizzazione del calendario interno degli interventi, le manovre all'interno dell'area dell'officina, la gestione delle proprie risorse, l'esecuzione degli interventi e la rimessa in linea dei convogli nuovamente disponibili. Le azioni dei due soggetti devono essere coordinate in relazione alla parte logistica (i chilometri aggiornati influenzano la pianificazione degli interventi) e alla gestione delle movimentazioni (invio e ritiro dei convogli dalla linea all'area dell'officina). In Figura 91, i processi simulati tramite il software Arena sono evidenziati da un rettangolo tratteggiato, le relazioni tra i soggetti sono messe in evidenza con frecce tratteggiate. Gli eventi imprevisti o gli investimenti che verranno proposti nella campagna multi – scenario sono inseriti nella figura sottostante in corrispondenza dell'azione principale su cui ricade l'effetto, tramite frecce illustrate nella seguente legenda.

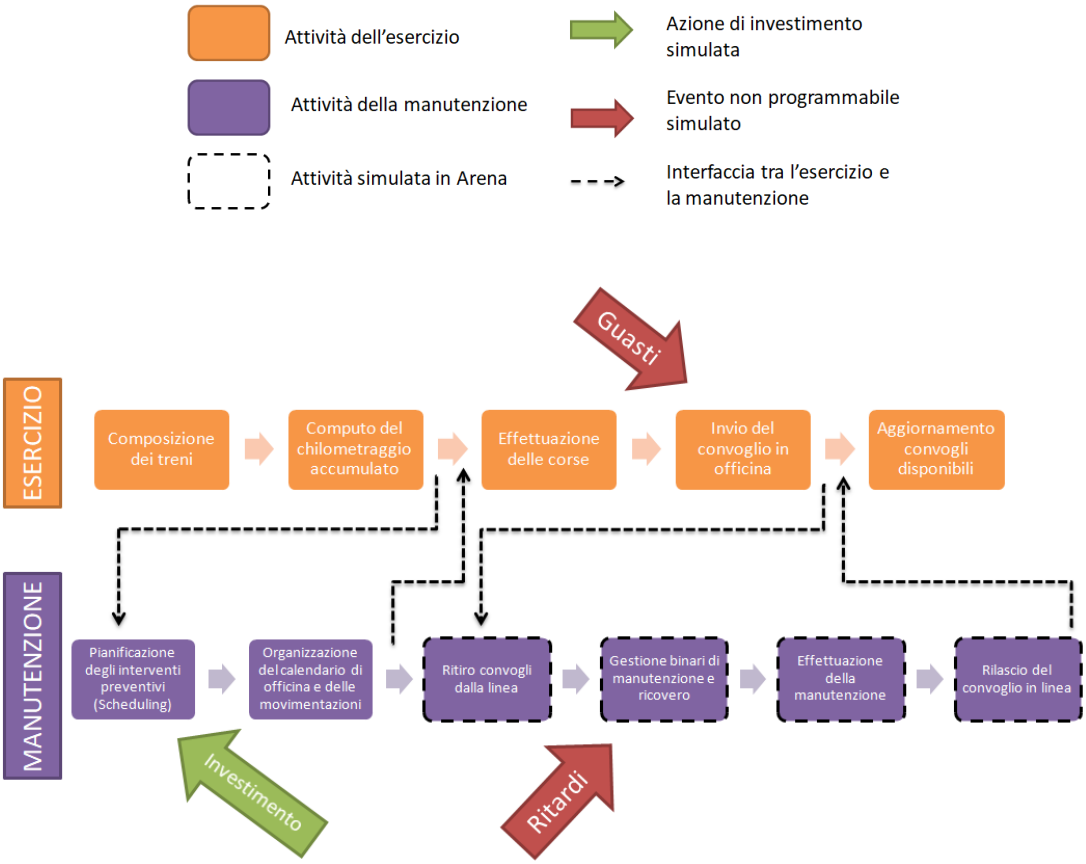


Figura 91 - Processo attuale "AS IS"

6.2.3. *Moduli di Arena sviluppati*

Di seguito saranno descritte le varie fasi per l'elaborazione del modello simulativo. Inizialmente avviene la generazione di 6 convogli al giorno, pari al numero massimo di manovre eseguibili dall'officina nel singolo giorno. L'entità legge da Excel la riga corrispondente alla sua attività di officina (Figura 92). Essa può essere nulla se non sono assegnati convogli realmente fisici a quello slot e, quindi, l'officina è libera da quella manovra (ID0), oppure può avere una o più operazioni da fare (al massimo 4). Sulla riga sono letti gli attributi per ogni entità, compilati dall'officina in fase di programmazione (Figura 93).

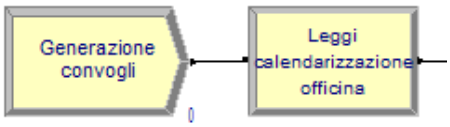


Figura 92 - Generazione convogli e lettura della schedulazione di officina (Screenshoot del modello implementato in Arena)

ID_OPERAZIONE	Impresa	TTR	1Attività	1Binario	1Entrata	1Uscita	2Attività	2Binario	2Entrata	2Uscita	3Attività	3Binario	3Entrata	3Uscita	4Attività	4Binario	4Entrata	4Uscita
ID1	GTT	TTR7	R1	1O	20191230	20191202	ND	ND	0	0	ND	ND	0	0	ND	ND	0	0
ID2	GTT	TTR8	R3	2O	20191230	20191203	ND	ND	0	0	ND	ND	0	0	ND	ND	0	0
ID3	GTT	TTR16	Ricovero	1R	20191230	20191202	R1	1O	20191202	20191203	ND	ND	0	0	ND	ND	0	0
ID0	GTT	ND	ND	ND	0	0	ND	ND	0	0	ND	ND	0	0	ND	ND	0	0
ID0	GTT	ND	ND	ND	0	0	ND	ND	0	0	ND	ND	0	0	ND	ND	0	0
ID0	GTT	ND	ND	ND	0	0	ND	ND	0	0	ND	ND	0	0	ND	ND	0	0

Figura 93 - Documento di scheduling di officina letto dal modulo ReadWrite (Screenshoot del file Excel)

Come si evidenzia in Figura 94, gli attributi assegnati sono:

- *Impresa*: in questo caso l'officina fornisce servizio solo a convogli del Gruppo Torinese Trasporti;
- *Nome del convoglio*: identificativo unico del convoglio letto in testa allo stesso.

Per ogni attività da eseguire viene inoltre assegnato:

- Il tipo di attività: tipologia di intervento manutentivi, guasto o ricovero;
- Il binario assegnato;
- La data di entrata (qui usata in formato AAAAMMGG);
- La data di uscita (qui usata in formato AAAAMMGG);

Successivamente viene assegnata la data odierna ad ogni convoglio, corrispondente alla data di generazione dell'entità nel modello. Questa fase è importante per far coincidere il calendario reale con il calendario interno al software (Figura).

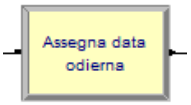


Figura 94 - Assegnazione della data corrente. Ad ogni data è associato in automatico da Excel un numero progressivo al quale si farà riferimento per interfacciare Excel con Arena (Screenshoot del modello implementato in Arena)

Attraverso il primo modulo *Decide* si stabilisce se l'entità deve effettuare un'operazione di manutenzione per la settimana corrente, l'entità viene indirizzata nelle aree predisposte altrimenti viene scartata. Il secondo modulo *Decide* simula se la data letta da Excel corrisponde al giorno corrente della simulazione: in caso affermativo, le entità vengono instradate nel modulo *Hold* e aspettano il segnale di inizio turno, altrimenti sono messe in attesa ed ogni giorno viene incrementata la data di 1 unità e valutato se è il giorno corretto per entrare (Figura 95).

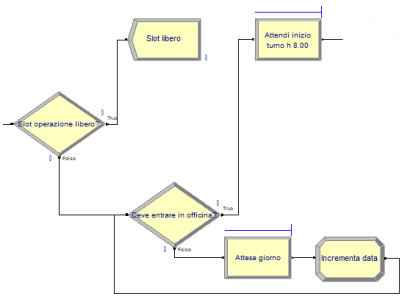


Figura 95 - Corretta entrata nel giorno previsto dallo scheduling (Screenshoot del modello implementato in Arena)

Ogni giorno viene creata un'entità *giorno* che attiva il segnale per rilasciare le due code "attesa giorno" e "inizio turno" al fine di far partire tutti i processi (Figura 96).

Figura 96 - Generazione segnali (Screenshoot del modello implementato in Arena)

Viene successivamente letto da Arena il numero di operazioni che deve eseguire il convoglio (da 1 a 4) e vengono attribuiti i rispettivi valori numerici (0 = nessuna attività prevista, 1 = attività prevista). Essi sono utilizzati successivamente per smarcare se l'attività è già stata svolta oppure no. Successivamente le entità vengono mandate alla corretta attività di manutenzione (1^{a} attività) o ricovero (Figura 97).

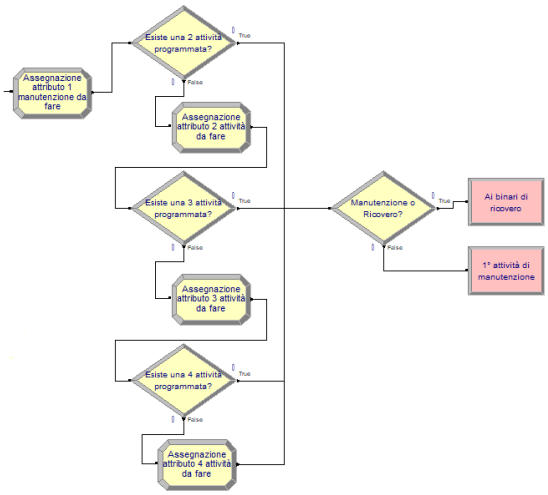


Figura 97 - Lettura attività e instradamento verso la prima operazione (Screenshoot del modello implementato in Arena)

Per l'attività di ricovero, viene inizialmente smarcato il corrispettivo indice (impostato da 1 a 0) e successivamente si indirizza l'entità verso i binari per la corrispettiva durata di intervento letta dal file Excel. Le risorse *binari di ricovero* non hanno una specializzazione, tuttavia i convogli sono instradati verso il binario prescelto dall'officina. L'utilizzo di questa risorsa corrisponde alla coda e rappresenta l'eventuale collo di bottiglia (Figura 98).

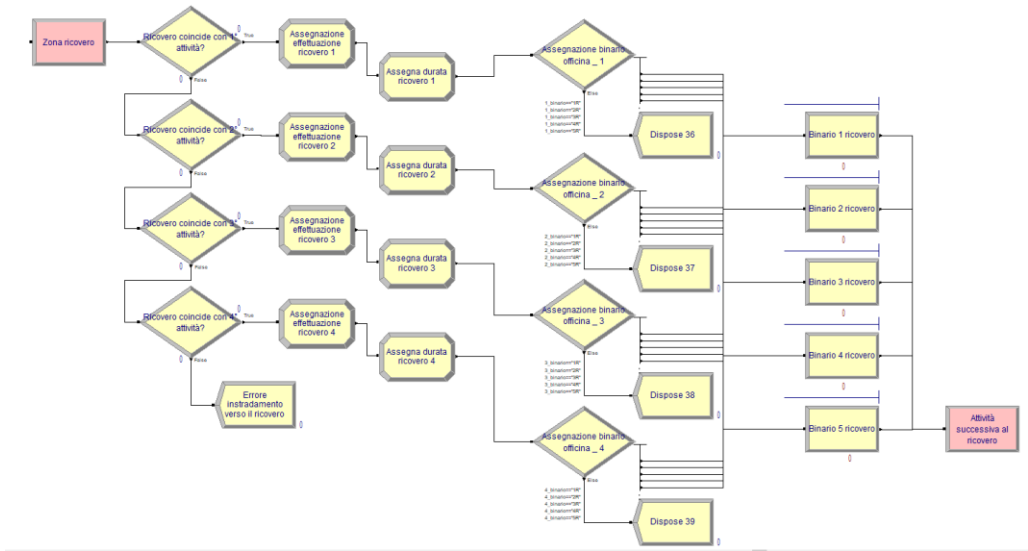


Figura 98 - Attività di ricovero (Screenshoot del modello implementato in Arena)

Per l'attività di manutenzione si imposta un processo simile al ricovero attività tenendo presente la specializzazione dei binari di officina. In particolare si assegna la durata letta dal file Excel, si imposta l'attività dallo stato "da fare" allo stato "eseguita" (indice impostato da

1 a 0), si assegna il binario previsto dall'officina e si instrada verso la risorsa assegnata (Figura 99).

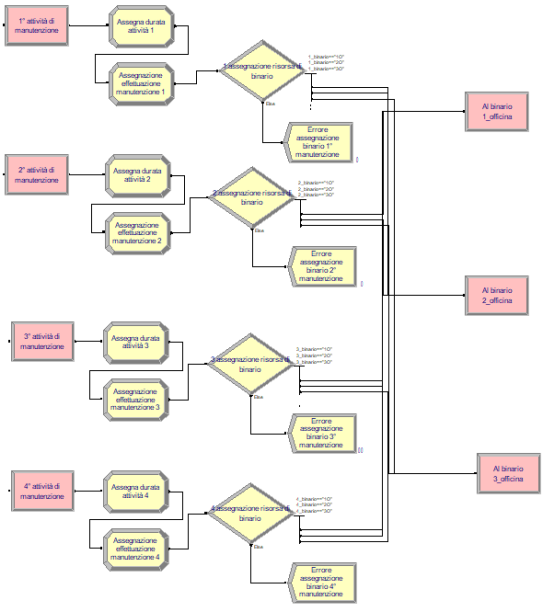


Figura 99 - Assegnazione durata e binario di manutenzione (Screenshoot del modello implementato in Arena)

Svolta l'attività di manutenzione o riparazione nella risorsa prevista e nella durata pianificata, viene letto se il convoglio ha bisogno di effettuare ulteriori attività, nel caso viene indirizzato verso di esse, oppure esce dalla simulazione (Figura 100).

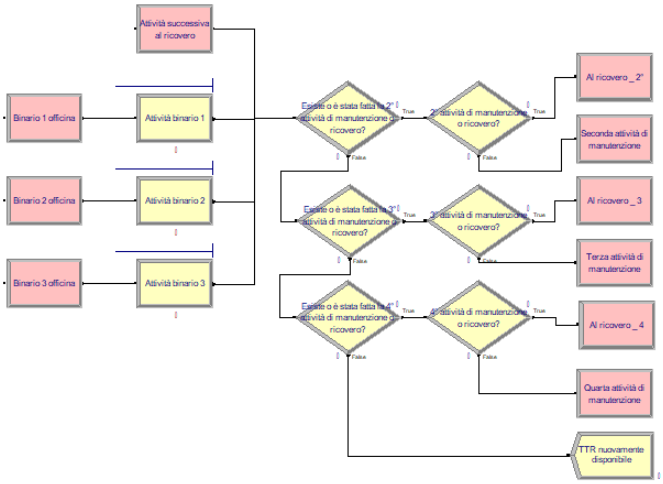


Figura 100 - Attività di manutenzione e lettura delle successive attività pianificate (Screenshoot del modello implementato in Arena)

6.3. Campagna di simulazione multi - scenario

Verranno ora descritti i principali scenari oggetto di studio nella campagna simulativa e i relativi risultati ottenuti. Concettualmente possiamo suddividere gli scenari proposti in tre gruppi:

- *Scenario n. 0*: lo scenario base oggetto dei principali confronti;
- *gli scenari imprevisti* (da 1 a 2f): in cui verranno valutati tutti gli eventi non pianificabili quali guasti e ritardi;
- *gli scenari propositivi* (3 e 4): nei quali saranno oggetto di studio le azioni di investimento o riqualificazione volte a migliorare la potenzialità dell'impianto di manutenzione.

Le conclusioni si basano su considerazioni sia lato officina, andando a considerare come principali KPIs i tempi di effettiva lavorazione ("*Value added cost*") e i tempi di ricovero ("Wait cost") per mancanza di risorse, sia lato esercizio verificando la disponibilità dei convogli. In particolare verranno presi in considerazione l'indice di disponibilità, definito come il numero di veicoli sostituibili in caso di eventi imprevisti e il coefficiente di copertura turni (*CCT*) (Figura 101) definito come:

$$\frac{numero\ veicoli\ disponibili}{numero\ veicoli\ necessari\ per\ le\ composizioni}$$

$$\begin{cases} >1\text{: i veicoli disponibili superano il necessario} \\ =1\text{: i veicoli sono lo stretto indispensabile} \\ <1\text{: i veicoli sono in carenza rispetto il necessario} \end{cases}$$

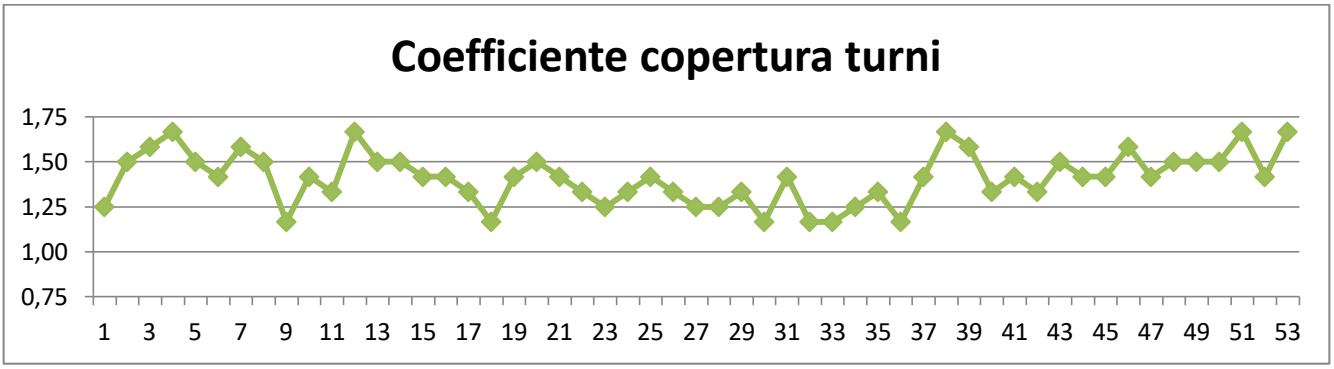


Figura 101 - Coefficiente copertura turni per l'anno 2020 (Scenario n. 0)

Inoltre, al fine di fornire anche una valutazione monetaria del tempo risparmiato o del ritardo, in accordo con la media nazionale (ISTAT, 2019), si stima il costo dell'officina di manutenzione a 48 €/h. Un ulteriore aspetto valutato sarà la resilienza, ovvero la capacità di tornare alla programmazione originale dopo un certo intervallo di tempo.

6.3.1. Scenario n. 0: Schedulazione dell'officina

Lo scenario denominato "scenario n. 0" è da ritenersi come lo scenario di riferimento per i successivi confronti. In questo scenario base verrà simulata la schedulazione di officina progettata e perciò rappresenterà una condizione linea maggiormente teorica. In particolare, dato il giro-macchine presente in Figura 86 A e B, si compila la programmazione delle movimentazioni e delle attività dell'officina in modo deterministico per l'intero anno: le durate delle diverse attività sono completamente rispettate e congrue a quelle previste nella trama di manutenzione (*paragrafo 4.3.3*) e non vi sono eventi imprevisti. Il numero di addetti in officina è da ritenersi sufficiente per svolgere tutte le operazioni rispettando le scadenze pianificate. Ovviamente tale condizione si discosta dalla realtà; tuttavia rappresenta solo un termine di confronto tra gli scenari essendo essa la situazione di progetto. I valori dei KPIs considerati sono riassunti in Tabella 42:

Key Performance Index	*Scenario 0*
Value Added Cost [h]	7728
Wait Cost [h]	4272
Total Cost [h]	12000

Tabella 42 – Scenario n. 0: valori dei KPIs

Secondo questi risultati, l'attività di manutenzione complessiva si stima a 12000 h per l'anno 2020 di cui il 64% (7728 h) di effettiva lavorazione e il 36% (4272 h) di coda per mancanza di disponibilità di risorse. Si stima perciò il costo delle attività come:

$$Costo\ manutenzione\ linea\ SFM1 = 48\frac{€}{h} * 7728\frac{h}{anno} = 370{\cdot}944\frac{€}{anno}$$

Si differenziano inoltre i risultati per ogni risorsa di officina e di ricovero (Tabella 43). Si evidenzia inoltre un utilizzo uniforme di 5 binari di ricovero su 7, uno scarso utilizzo del primo binario e un'organizzazione volta a conservare un binario (il numero 7) sempre libero:

Time per Entity	Average	Minimum Value	Maximum Value	Average	Minimum Value	Maximum Value
	Scenario 0					
VA Time per Entity	[gg]			[h]		
Binario 1	1,24	1,00	5,00	29,79	24,00	120,00
Binario 2	1,47	1,00	4,00	35,16	24,00	96,00
Binario 3	9,35	10,00	12,00	224,40	240,00	288,00
Binario Ricovero 1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Binario Ricovero 2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Binario Ricovero 3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Binario Ricovero 4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Binario Ricovero 5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Binario Ricovero 6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Binario Ricovero 7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Wait Time per Entity	[gg]			[h]		
Binario 1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Binario 2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Binario 3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Binario Ricovero 1	2,70	1,00	10,00	64,80	24,00	240,00
Binario Ricovero 2	7,00	1,00	14,00	168,00	24,00	336,00
Binario Ricovero 3	6,40	3,00	9,00	153,60	72,00	216,00
Binario Ricovero 4	7,67	2,00	14,00	184,00	48,00	336,00
Binario Ricovero 5	7,00	7,00	7,00	168,00	168,00	168,00
Binario Ricovero 6	6,00	6,00	6,00	144,00	144,00	144,00
Binario Ricovero 7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabella 43 – Scenario n. 0: valore medi, minimi e massimi dei costi divisi per ogni risorsa

Dai dati della Tabella 43 si costruisce agevolmente il grafico in Figura 102. Si noti come il lavoro sia equamente distribuito sulle due vie dedicate alla manutenzione ordinaria (binario 1 e binario 2). Risulta un forte sbilanciamento di lavoro sulla terza via dedicata esclusivamente alle torniture delle ruote, operazione onerosa in termini temporali. Si evidenzia perciò il primo elemento di criticità nella gestione della manutenzione: la tornitura delle ruote.

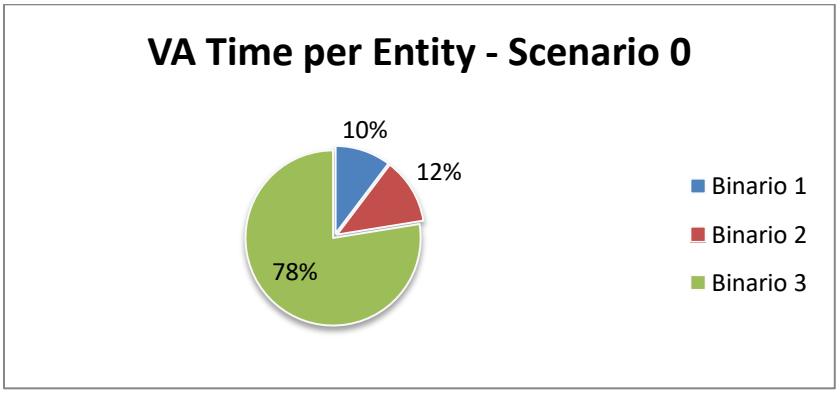


Figura 102 - Scenario n. 0: lavorazione percentuale per le diverse risorse

Si mette infine in evidenza il tempo accumulato durante l'anno (Tabella 44):

Accumulated Time	*Scenario 0*	
	[gg]	[h]
Binario 1	72	1728
Binario 2	63	1512
Binario 3	187	4488
Binario Ricovero 1	54	1296
Binario Ricovero 2	56	1344
Binario Ricovero 3	32	768
Binario Ricovero 4	23	552
Binario Ricovero 5	7	168
Binario Ricovero 6	6	144
Binario Ricovero 7	0	0

Tabella 44 - Scenario n. 0: lavoro annuo per risorsa

Dallo scenario base si ricava l'andamento della disponibilità lungo le settimane dell'anno (Tabella 45 e Figura 103). Tale valutazione è a favore di sicurezza in quanto, un convoglio che finisce la manutenzione in settimana risulta nuovamente disponibile per l'esercizio ma non è conteggiato in questo calcolo, eseguito su base settimanale. Nella successiva tabella viene evidenziata in rosso la settimana peggiore lato manutenzione[17], in giallo la settimana peggiore lato esercizio, in verde il giorno migliore.

Giro Macchine	Inizio	Fine	Convogli in officina	Convogli parcheggiati	*Giro Macchine*	Inizio	Fine	Convogli in officina	Convogli parcheggiati
Settimana 1	30/12/2019	05/01/2020	3	3	Settimana 28	07/01/1900	07/01/1900	3	3
Settimana 2	06/01/2020	12/01/2020	2	6	Settimana 29	14/01/1900	14/01/1900	1	4
Settimana 3	13/01/2020	19/01/2020	1	7	Settimana 30	21/01/1900	21/01/1900	4	2
Settimana 4	20/01/2020	26/01/2020	0	8	Settimana 31	28/01/1900	28/01/1900	1	5
Settimana 5	27/01/2020	02/02/2020	2	6	Settimana 32	04/02/1900	04/02/1900	4	2
Settimana 6	03/02/2020	09/02/2020	3	5	Settimana 33	11/02/1900	11/02/1900	4	2
Settimana 7	10/02/2020	16/02/2020	0	7	Settimana 34	18/02/1900	18/02/1900	4	3
Settimana 8	17/02/2020	23/02/2020	2	6	Settimana 35	25/02/1900	25/02/1900	4	4
Settimana 9	24/02/2020	01/03/2020	6	2	Settimana 36	03/03/1900	03/03/1900	5	2
Settimana 10	02/03/2020	08/03/2020	3	5	Settimana 37	10/03/1900	10/03/1900	3	5
Settimana 11	09/03/2020	15/03/2020	4	4	Settimana 38	17/03/1900	17/03/1900	0	8
Settimana 12	16/03/2020	22/03/2020	0	8	Settimana 39	24/03/1900	24/03/1900	1	7
Settimana 13	23/03/2020	29/03/2020	2	6	Settimana 40	31/03/1900	31/03/1900	4	4
Settimana 14	30/03/2020	05/04/2020	2	6	Settimana 41	07/04/1900	07/04/1900	3	5
Settimana 15	06/04/2020	12/04/2020	2	5	Settimana 42	14/04/1900	14/04/1900	4	4
Settimana 16	13/04/2020	19/04/2020	3	5	Settimana 43	21/04/1900	21/04/1900	2	6
Settimana 17	20/04/2020	26/04/2020	4	4	Settimana 44	28/04/1900	28/04/1900	3	5
Settimana 18	27/04/2020	03/05/2020	4	2	Settimana 45	05/05/1900	05/05/1900	2	5
Settimana 19	04/05/2020	10/05/2020	3	5	Settimana 46	12/05/1900	12/05/1900	1	7
Settimana 20	11/05/2020	17/05/2020	2	6	Settimana 47	19/05/1900	19/05/1900	3	5
Settimana 21	18/05/2020	24/05/2020	3	5	Settimana 48	26/05/1900	26/05/1900	2	6
Settimana 22	25/05/2020	31/05/2020	3	4	Settimana 49	02/06/1900	02/06/1900	2	6
Settimana 23	01/06/2020	07/06/2020	3	3	Settimana 50	09/06/1900	09/06/1900	2	6
Settimana 24	08/06/2020	14/06/2020	3	4	Settimana 51	16/06/1900	16/06/1900	0	8
Settimana 25	15/06/2020	21/06/2020	3	5	Settimana 52	23/06/1900	23/06/1900	3	5
Settimana 26	22/06/2020	28/06/2020	4	4	Settimana 53	30/06/1900	30/06/1900	0	8
Settimana 27	29/06/2020	05/07/2020	5	3					

Tabella 45 - Disponibilità convogli. (vedi successivi scenari).

[17] La settimana peggiore lato manutenzione è stata scelta non solo in base al numero di convogli in lavorazione, ma valutando anche la mole di lavoro nel periodo immediatamente prima e dopo la settimana e il numero di veicoli parcheggiati. In questo modo si sceglie la settimana 27 rispetto la settimana 9: nel periodo estivo il personale di officina è ridotto, il numero di veicoli complessivamente nelle settimane precedenti e successivi è minore ed inoltre l'officina arriva da un periodo carico in cui è possibile si porti dietro ritardi di lavorazione.

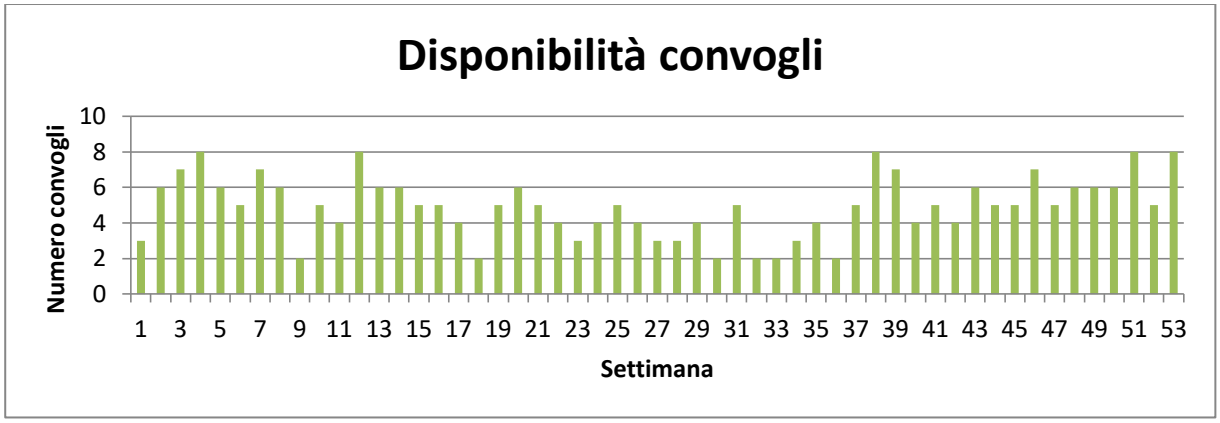


Figura 103 - Disponibilità convogli durante l'anno 2020 secondo la pianificazione

L'impegno settimanale dell'officina durante l'anno viene rappresentato in Figura 104:

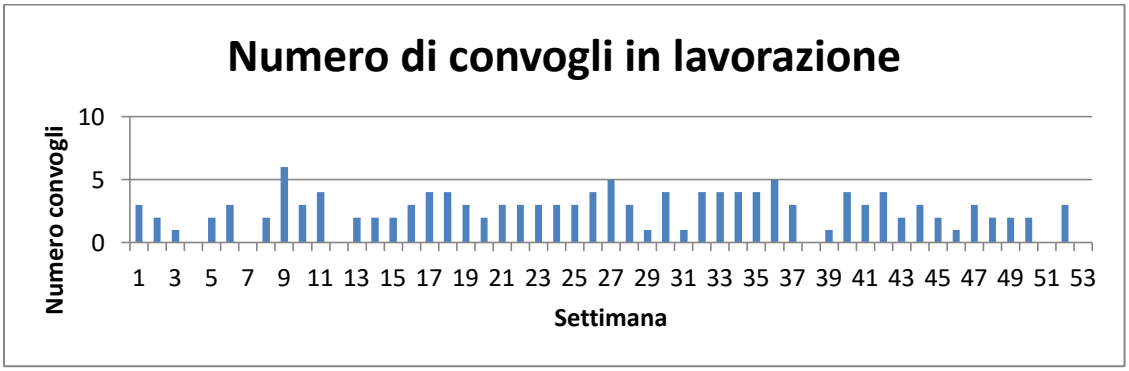


Figura 104 - Numero convogli settimanali in lavorazione secondo la pianificazione

Risulta infine utile capire l'effettiva potenzialità dell'impianto e stabilire il numero di convogli che l'officina riuscirebbe a gestire in più durante l'anno. A tal fine viene proposto il seguente metodo di calcolo:

- viene conteggiato il numero di volte in cui il convoglio è impiegato nel singolo intervento (Tabella 46);
- si effettua la media per categoria di intervento e si moltiplica per la durata specifica dell'intervento;
- si sommano le medie delle durate degli interventi fatti per ogni tipologia.

N	R1	R2	R3	Tornitura
TTR1	3	1	2	1
TTR2	3	2	2	1
TTR3	2	1	1	1
TTR4	2	1	1	1
TTR5	2	1	1	1
TTR6	3	2	1	1
TTR7	3	1	2	1
TTR8	3	1	2	1
TTR9	2	2	1	1
TTR10	2	2	1	1
TTR11	2	2	1	1
TTR12	2	2	1	1
TTR13	2	0	1	1
TTR14	2	1	1	1
TTR15	2	2	1	1
TTR16	2	2	1	1
TTR17	3	1	1	1
TTR18	2	1	1	1
TTR19	2	2	1	1
TTR20	3	2	1	1
Media [-]	2,35	1,45	1,2	1
Media [gg]	2,35	1,45	2,4	8
Somma	14	*= in media quanto occupa 1 convoglio durante l'anno*		

Tabella 46 - Numero di interventi per categoria e convoglio

Si trova che in media ogni convoglio occupa 14 giorni in officina in un anno. Avendo trovato nella simulazione dello scenario n. 0 che l'occupazione totale è di 284 giorni su 301 giorni lavorativi, si trovano per differenza i giorni liberi dell'officina (17 giorni). Dovendo avere a disposizione in media 14 giorni, l'officina è in grado di aggiungere al massimo 1 convoglio nella sua schedulazione.

6.3.2. Scenario n. 1: Ritardi dell'officina

Come si può facilmente intuire lo scenario n. 0 non corrisponderà mai alla situazione reale in quanto la programmazione durante l'anno varierà per molteplici cause. Qui viene considerata una generica condizione di non conformità tra i tempi pianificati e quelli effettivamente svolti. Il presente scenario può ulteriormente essere particolareggiato considerando i singoli eventi possibili (ritardo fornitura dei pezzi, scioperi, carenza di personale, ecc.) ed effettuando con opportune proporzioni l'influenza dell'evento sui tempi pianificati. Nello scenario n.1 si prende in esame un caso generico basandosi sull'esperienza del Gruppo Torinese Trasporti nella gestione dell'officina di manutenzione. In particolare si stabilisce che la durata di ogni attività di manutenzione ordinaria sia descritta da una distribuzione di probabilità triangolare (Figura 105):

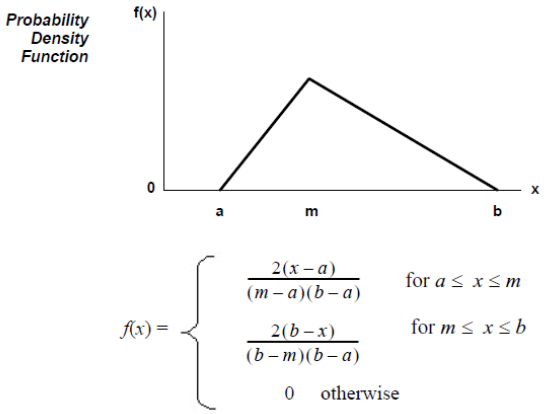


Figura 105 - Funzione di densità di probabilità triangolare (Fonte: Arena user's guide, 2019)

Con riferimento alla Figura 105Figura , si scelgono i seguenti valori empirici basati sull'esperienza del personale del Gruppo Torinese Trasporti:

a Valore di durata minimo = 0,9m

m Valore di durata desiderato = valore di progetto

b Valore di durata massimo = 1,5m

La funzione evidenzia un forte sbilanciamento verso la condizione di ritardo (valore *b*) rispetto a una possibilità di rilascio del convoglio in anticipo (valore *a*). Tali valori, di natura empirica, comprendono tutti quei ritardi di piccola entità che possono avvenire giornalmente ed esclude i ritardi ingenti spesso dovuti a cause esterne all'azienda. In questa valutazione vengono escluse le torniture delle ruote che rimangono costanti ad un valore di 8 giorni. I valori dei KPIs trovati sono riassunti in Tabella :

Key Performance Index	*Scenario 1*
Value Added Cost [h]	8285
Wait Cost [h]	4272
Total Cost [h]	12557

Tabella 47 - Scenario n. 1: valori dei KPIs

Si nota, rispetto lo scenario n. 0, un incremento di 557 h di lavorazione pari al 7,5%.

Inoltre i risultati sono stati differenziati per ogni risorsa di officina e di ricovero (Tabella 48):

Time per Entity	Average	Minimum Value	Maximum Value	Average	Minimum	Maximum Value
	Scenario 1					
VA Time per Entity	[gg]			[h]		
Binario 1	1,48	0,97	6,84	35,62	23,20	164,16
Binario 2	1,68	0,96	4,32	40,26	23,03	103,70
Binario 3	9,35	0,00	12,00	224,40	0,00	288,00
Binario Ricovero 1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Binario Ricovero 2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Binario Ricovero 3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Binario Ricovero 4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Binario Ricovero 5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Binario Ricovero 6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Binario Ricovero 7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Wait Time per Entity	[gg]			[h]		
Binario 1	0,04	0,00	0,78	0,99	0,00	18,66
Binario 2	0,01	0,00	0,53	0,30	0,00	12,63
Binario 3	0,03	0,00	0,56	0,67	0,00	13,39
Binario Ricovero 1	2,70	1,00	10,00	64,80	24,00	240,00
Binario Ricovero 2	7,00	1,00	14,00	168,00	24,00	336,00
Binario Ricovero 3	6,40	3,00	9,00	153,60	72,00	216,00
Binario Ricovero 4	7,67	2,00	14,00	184,00	48,00	336,00
Binario Ricovero 5	7,00	7,00	7,00	168,00	168,00	168,00
Binario Ricovero 6	6,00	6,00	6,00	144,00	144,00	144,00
Binario Ricovero 7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabella 48 - Scenario n. 1: risultati divisi per risorsa

Come si può vedere, la coda sui binari di ricovero aumenta non in modo significativo se si considerano le medie sull'intero anno (valori massimi di 1h/lavorazione), tardando realisticamente l'uscita del convoglio al più di mezzo giornata. Anche se la ripercussione sui binari di ricovero non risulta significativa, l'incremento del monte ore annuale di lavorazione provoca un costo aggiunto di circa 26˙722 € annui, corrispondente a 265 €/intervento. Il numero di ore cumulate annue per risorsa è fornito dalla Tabella 49,

Accumulated Time	Scenario 1	
	[gg]	[h]
Binario 1	86	2066
Binario 2	72	1731
Binario 3	187	4488
Binario Ricovero 1	54	1296
Binario Ricovero 2	56	1344
Binario Ricovero 3	32	768
Binario Ricovero 4	23	552
Binario Ricovero 5	7	168
Binario Ricovero 6	6	144
Binario Ricovero 7	3	83

Tabella 49 - Scenario n. 1: lavoro annuo per risorsa

Il CCT non è influenzato dai ritardi in quanto essi rappresentano piccole unità temporali e perciò sono riassorbiti dal sistema all'interno della medesima settimana di lavorazione.

6.3.3. Scenario n. 2: guasti in linea

Tutti gli scenari denominati "*2*" proposti nella campagna di simulazione fanno riferimento a situazioni di guasto del convoglio. Il guasto comporta l'immediata sostituzione di esso con

un convoglio disponibile nel parcheggio. Al verificarsi dell'imprevisto, la Direzione dell'Esercizio provvede a minimizzare i disagi all'interno della giornata, sopprimendo il minor numero possibile di treni, e a recuperare la regolarità del servizio al massimo il giorno seguente. Per la simulazione di questi scenari si seguirà il seguente schema (Tabella 50):

Denominazione	*Periodo*	*Durata*
2A	Giorno peggiore lato esercizio	1 giorno
2B	Giorno peggiore lato manutenzione	1 giorno
2C	Giorno migliore	1 giorno
2D	Giorno peggiore lato esercizio	5 giorni
2E	Giorno peggiore lato manutenzione	5 giorni
2F	Giorno migliore	5 giorni

Tabella 50 - Scenari di guasto

Si riportano ora i principali KPIs analizzati per gli scenari elencati in Tabella 51 e lo scenario di riferimento (scenario n. 0):

Key Performance Index	*Scenario 0*	*Scenario 2a*	*Scenario 2b*	*Scenario 2c*	*Scenario 2d*	*Scenario 2e*	*Scenario 2f*
Value Added Cost [h]	7728	7752	7752	7752	7824	7872	7848
Wait Cost [h]	4272	4320	4296	4272	4488	4248	4272
Total Cost [h]	12000	12072	12048	12024	12312	12120	12120

Tabella 51 - Scenario n. 2: valori dei KPIs

Come si evince dalla Tabella 51, le situazioni peggiori ricadono negli interventi di manutenzione correttiva stimati a 5 giorni, con un incremento da 120 (scenario n.2e) a 312 ore (scenario n.2d) complessive di impossibilità di utilizzo dei convogli. Lo scenario di minore interesse, in linea con le aspettative, è quello riferito al guasto nel giorno migliore di durata 1 giorno (scenario n. 2C). Risulta interessante notare un incremento dei tempi che si distribuisce in modo differenziato tra il tempo di ricovero e il tempo di lavorazione effettivo. In particolare si può notare che nello scenario n. 2D, riferito al giorno peggiore lato esercizio, il guasto si ripercuote maggiormente sulla zona di ricovero (incremento di 216 h) rispetto alle vie di manutenzione (incremento di 96 h); al contrario, nello scenario n. 2E l'intervento di riparazione ha come effetto un incremento di 144 h nelle vie dell'officina ma un decremento nella zona di ricovero (-24 h). Quest'ultimo fatto è dovuto alla diversa priorità che l'officina assegna ai convogli guasti e quindi all'organizzazione interna. Seppur il decremento della coda di ricovero possa rappresentare un aspetto positivo, esso non è un elemento di grande vantaggio in quanto:

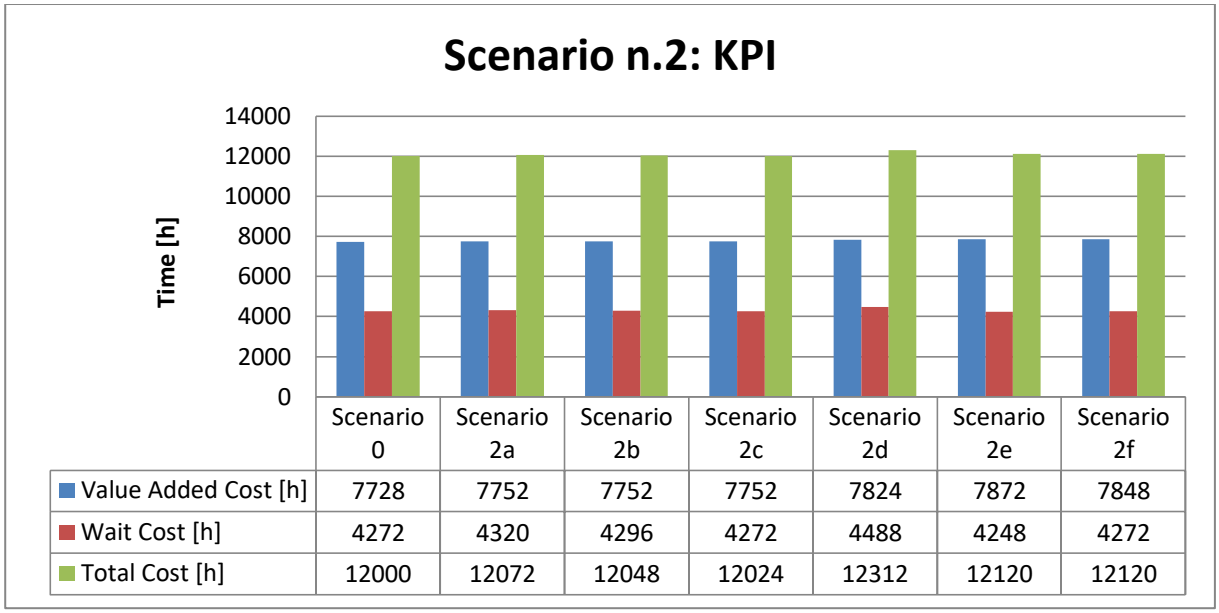
- Le risorse nella zona di ricovero sono fortemente in eccesso , come si può notare dalla Tabella 51 dove i valori del *Wait Time* risultano particolarmente bassi se non nulli;
- L'incremento della lavorazione nella via dell'officina ha un peso maggiormente determinante rispetto l'esiguo risparmio in coda di ricovero.

Si prendono ora in considerazione solo gli scenari 2D e 2E, in quanto quelli maggiormente significativi. Si vede come la gestione sia comunque orientata ad un utilizzo uniforme delle due vie di manutenzione, sintomo di una buona pianificazione nella gestione delle risorse. Questa peculiarità si evince dall'uniforme incremento del tempo medio tra il Binario 1 e il Binario 2. Rivolgendo invece l'attenzione ai binari di ricovero, si nota l'importanza di avere un binario sempre libero (binario ricovero 7) da dedicare a un evento di guasto. La possibilità infrastrutturale di una zona dedicata agli eventi imprevisti semplifica le manovre e permette di avere un primo punto certo di stazionamento pronto per essere usato senza intaccare la restante zona di ricovero e provvedere a più complicate movimentazioni di materiale rotabile. Questo fattore è evidenziabile nella valutazione dei tempi dell'ultima riga della Tabella 52 che, nello scenario n. 0, risultavano nulli.

Time per Entity	*Average*	*Minimum Value*	*Maximum Value*	*Average*	*Minimum Value*	*Maximum Value*	*Average*	*Minimum Value*	*Maximum Value*	*Average*	*Minimum Value*	*Maximum Value*
	Scenario 2D						***Scenario 2E***					
VA Time per Entity	[gg]			[h]			[gg]			[h]		
Binario 1	1,29	1,00	5,00	30,92	24,00	120,00	1,24	1,00	5,00	29,76	24,00	120,00
Binario 2	1,45	1,00	4,00	34,91	24,00	96,00	1,57	1,00	6,00	37,68	24,00	144,00
Binario 3	9,35	10,00	12,00	224,40	240,00	288,00	9,35	10,00	12,00	224,40	240,00	288,00
Binario Ricovero 1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Binario Ricovero 2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Binario Ricovero 3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Binario Ricovero 4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Binario Ricovero 5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Binario Ricovero 6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Binario Ricovero 7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Wait Time per Entity	[gg]			[h]			[gg]			[h]		
Binario 1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Binario 2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Binario 3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Binario Ricovero 1	2,70	1,00	10,00	64,80	24,00	240,00	2,70	1,00	10,00	64,80	24,00	240,00
Binario Ricovero 2	7,00	1,00	14,00	168,00	24,00	336,00	6,88	1,00	14,00	165,00	24,00	336,00
Binario Ricovero 3	6,40	3,00	9,00	153,60	72,00	216,00	6,40	3,00	9,00	153,60	72,00	216,00
Binario Ricovero 4	7,67	2,00	14,00	184,00	48,00	336,00	7,67	2,00	14,00	184,00	48,00	336,00
Binario Ricovero 5	7,00	7,00	7,00	168,00	168,00	168,00	7,00	7,00	7,00	168,00	168,00	168,00
Binario Ricovero 6	6,00	6,00	6,00	144,00	144,00	144,00	6,00	6,00	6,00	144,00	144,00	144,00
Binario Ricovero 7	9,00	9,00	9,00	216,00	216,00	216,00	6,00	6,00	6,00	144,00	144,00	144,00

Tabella 52 - Scenario n. 2D e 2E: Time per Entity

Complessivamente i risultati degli scenari 2 vengono riportati in Figura 106:



	Scenario 0	Scenario 2a	Scenario 2b	Scenario 2c	Scenario 2d	Scenario 2e	Scenario 2f
Value Added Cost [h]	7728	7752	7752	7752	7824	7872	7848
Wait Cost [h]	4272	4320	4296	4272	4488	4248	4272
Total Cost [h]	12000	12072	12048	12024	12312	12120	12120

Figura 106 - Risultati aggregati scenari n.2

Si nota come i guasti riparabili in 1 giorno lavorativo (scenari n. 2a - 2c) portano conseguenze molto simili, più interessanti sono gli scenari dove il guasto occupa l'officina per più giorni (scenari n. 2d - 2f) dove i valori si discostano maggiormente rispetto lo scenario n.0.

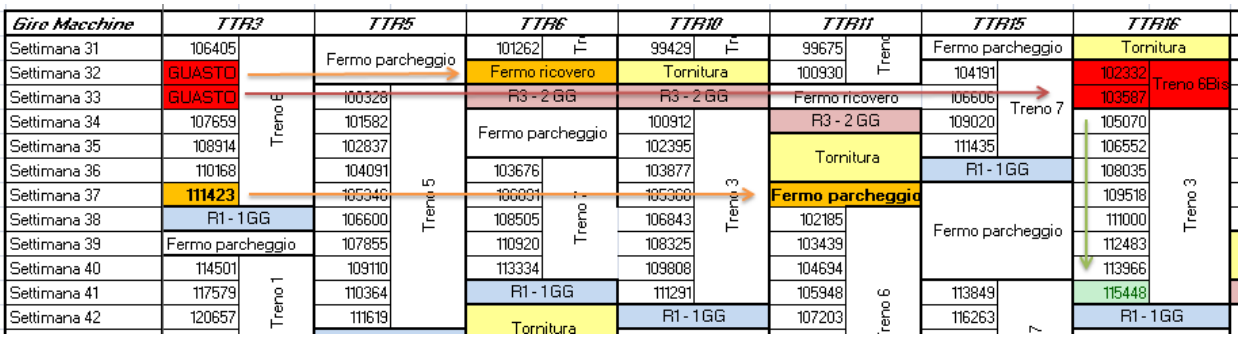
Si riportano inoltre i tempi accumulati per l'intero anno (Tabella 53):

Accumulated Time	*Scenario 2A*		*Scenario 2B*		*Scenario 2C*		*Scenario 2D*		*Scenario 2E*		*Scenario 2F*	
	[gg]	[h]	[gg]	[h]	[gg]	[h]	[gg]	[h]	[gg]	[h]	[gg]	[h]
Binario 1	72	1728	72	1728	72	1728	76	1824	72	1728	72	1728
Binario 2	64	1536	64	1536	64	1536	63	1512	69	1656	68	1632
Binario 3	187	4488	187	4488	187	4488	187	4488	187	4488	187	4488
Binario Ricovero 1	54	1296	54	1296	54	1296	54	1296	54	1296	54	1296
Binario Ricovero 2	56	1344	56	1344	56	1344	56	1344	55	1320	55	1320
Binario Ricovero 3	32	768	32	768	32	768	32	768	32	768	32	768
Binario Ricovero 4	23	552	23	552	23	552	23	552	23	552	23	552
Binario Ricovero 5	7	168	7	168	7	168	7	168	7	168	7	168
Binario Ricovero 6	6	144	6	144	6	144	6	144	6	144	6	144
Binario Ricovero 7	2	48	1	24	0	0	9	216	0	0	0	0

Tabella 53 - Scenario n. 2 A-F: tempi accumulati per l'anno 2020

È interessante comprendere gli effetti che i guasti hanno sull'esercizio, valutando la resilienza della pianificazione del giro-macchine. Se il ritardo dell'officina (scenario n. 1) risultava recuperabile e quindi di scarse implicazioni per il servizio erogato, il fermo di un convoglio in esercizio comporta la necessità di mettere a disposizione un altro veicolo e modificare lo scheduling a valle del fenomeno di guasto.

Per lo scenario n. 2D la situazione è quella rappresentata in Tabella 54:



Giro Macchine	TTR3		TTR5		TTR6		TTR10		TTR11		TTR15		TTR16	
Settimana 31	106405	Treno 8	Fermo parcheggio	Treno 5	101262	Tre	99429	Tre	99675	Trend	Fermo parcheggio		Tornitura	
Settimana 32	GUASTO				Fermo ricovero		Tornitura		100930		104191		102332	Treno 6Bis
Settimana 33	GUASTO		100328		R3 - 2 GG		R3 - 2 GG		Fermo ricovero		106606	Treno 7	103587	
Settimana 34	107659		101582		Fermo parcheggio		100912		R3 - 2 GG		109020		105070	Treno 3
Settimana 35	108914		102837				102395		Tornitura		111435		106552	
Settimana 36	110168		104091		103676		103877	Treno 3			R1 - 1 GG		108035	
Settimana 37	111423		105346		106831	Treno	105368		Fermo parcheggio		Fermo parcheggio		109518	
Settimana 38	R1 - 1 GG		106600		108505		106843		102185				111000	
Settimana 39	Fermo parcheggio		107855		110920		108325		103439				112483	
Settimana 40	114501		109110		113334		109808		104694				113966	
Settimana 41	117579	Treno 1	110364		R1 - 1 GG		111291		105948	Treno 6	113849		115448	
Settimana 42	120657		111619		Tornitura		R1 - 1 GG		107203		116263		R1 - 1 GG	

Tabella 54 - Scenario n. 2D: valutazione della resilienza. Il colore rosso rappresenta la conseguenza immediata del guasto (la sostituzione di convoglio), il colore arancione la conseguenza non immediata al guasto (la variazione di km sul lungo termine), il colore verde la congruità con quanto pianificato nonostante le variazioni.

In particolare si pianifica la sostituzione del TTR3 (soggetto del guasto in quanto treno più penalizzante) con il TTR16 in parcheggio per due settimane. Il TTR16 rispetta comunque la scadenza manutentiva anche se aumenta i chilometri, godendo del beneficio esposto nel *paragrafo 6.1.2 punto III*. Il TTR3 sposta la sua manutenzione di una settimana restando in servizio nella settimana 37: il TTR11 entrerà in servizio la settimana seguente ma rispetta la normale scadenza di manutenzione. Si sposta la manutenzione del TTR6 mandandolo in ricovero fino al 12/8 (diminuendo il numero di veicoli parcheggiati). Il recupero della normale programmazione è stimata dopo 6 settimane. Il CCT diminuisce localmente a 1,08 nella settimana del guasto (nella settimana 32 solo 1 veicolo è disponibile in caso di necessità) e assume il valore unitario nella settimana seguente (settimana 33). Ciò significa che in caso di un ulteriore evento di guasto o imprevisto l'impresa non è in grado di erogare il servizio stabilito con i mezzi a disposizione, obbligando ad una diminuzione nelle composizioni e un peggioramento della qualità del servizio offerto.

Per lo scenario n. 2E la situazione è quella rappresentata in Tabella 55 dove si sostituisce il TTR6 con il TTR8. La sostituzione provoca un effetto a catena sui chilometri degli altri convogli: al fine di garantire il servizio l'effetto si propaga fino alla settimana 44. Si rimanda la manutenzione del TTR16 della settimana successiva di 1 giorno, essendo le manutenzioni programmate della settimana precedente tutte urgenti. Si deve valutare se conviene modificare la programmazione così a lungo oppure far viaggiare il Treno 7 con 1 convoglio per la durata della riparazione. Nel caso si voglia mantenere il livello di servizio prestabilito e agire come in Tabella 55, il recupero della normale programmazione è stimato a 18 settimane. I CTT diminuiscono localmente nelle settimane 27, 28, 34, 35, 43 e 44, garantendo comunque sempre almeno due convogli parcheggiati di riserva e quindi attestando il coefficiente ad un valore minimo di 1,16.

Giro Macchine	TTR5	TTR6	TTR7	TTR8	TTR9	TTR10
Settimana 27	Tornitura	GUASTO	Tornitura	88956 Treno 7Bi	R1 - 1 GG	R1 - 1 GG
Settimana 28	Fermo parcheggio	GUASTO Treno 7		91371	90196 Treno 1	90196 Treno 1
Settimana 29		91604	Fermo parcheggio	Fermo parcheggio	93274	93274
Settimana 30		94019	102144 Treno 2	94450 Treno 2	96352	96352
Settimana 31		96433	105224	97529	99429	99429
Settimana 32		R3 - 2 GG	108303	100609	R3 - 2 GG	Tornitura
Settimana 33	100328 Treno 5	Fermo parcheggio	111382	103688	Tornitura	R3 - 2 GG
Settimana 34	101582	99513 Treno 2	114462	Fermo ricovero		100912 Treno 3
Settimana 35	102837	102592	R1 - 1 GG	R3 - 2 GG	102509 Treno 2	102395
Settimana 36	104091	105006 Treno 7	Fermo parcheggio	Tornitura	105588	103877
Settimana 37	105346	107421			108668	105360
Settimana 38	106600	109835	117541 Treno 2	Fermo parcheggio	111747	106843
Settimana 39	107855	112250	120621		114826	108325
Settimana 40	109110	114664	123700	106768 Treno 4	R1 - 1 GG	109808
Settimana 41	110364	R1 - 1 GG	126779	109847	Fermo parcheggio	111291
Settimana 42	111619	Tornitura	R2 - 1 GG	112927	117906 Treno 2	R1 - 1 GG
Settimana 43	R1 - 1 GG		Fermo parcheggio	116006 Fermo ricover	120585	114370 Treno 2B
Settimana 44	114698 Treno 2B			119085	124065	Fermo parcheggio

Tabella 55 - Scenario n. 2E: valutazione della resilienza. Il colore rosso rappresenta la conseguenza immediata del guasto (la sostituzione di convoglio), il colore arancione la conseguenza non immediata al guasto (la variazione di km sul lungo termine).

Prendendo in considerazione tutti gli scenari imprevisti (scenario n. 1 e 2 da A a F), si riporta in Figura 107 l'incremento di costi monetario. Si trova come una serie di ritardi piccoli durante l'anno porti a un incremento dei costi maggiore a fine periodo rispetto all'insorgenza di un guasto. Perciò risulta di notevole importanza per l'azienda diminuire il numero di guasti al più piccolo numero possibile ma riuscire anche ad avere una costante attenzione al rispetto dei tempi e alla minimizzazione dei ritardi. Ovviamente l'eventuale aumento di guasti comporterebbe un incremento dei costi complessivi ma ciò non comprometterebbe una sottovalutazione della perdita monetaria dovuta ai ritardi.

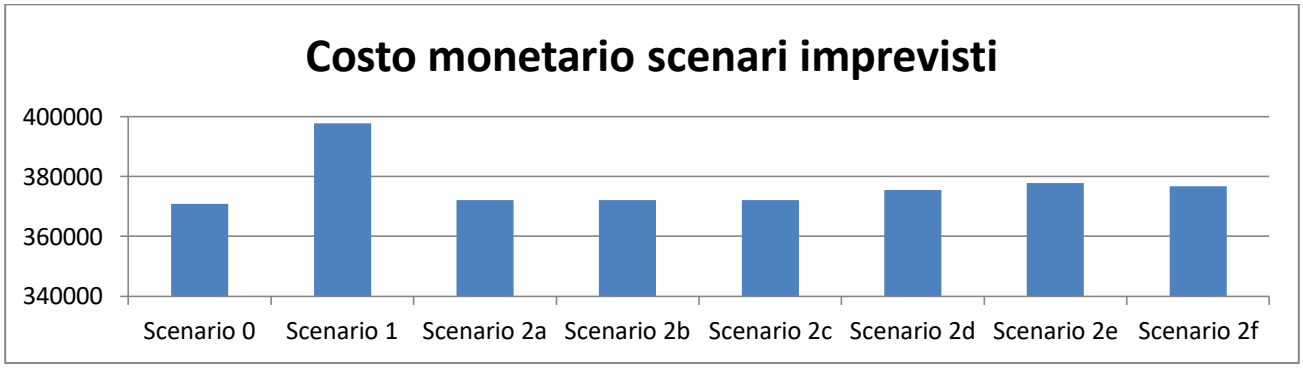


Figura 107 - Incremento dei costi monetari scenari imprevisti

6.3.4. Scenario n. 3: investimento ed attuazione del giro-ruote

Si propone ora la valutazione delle ripercussioni che ha l'investimento di 8 ruote nuove sull'efficienza dell'officina. Abbiamo già evidenziato come la tornitura delle ruote, che occupa 8 giorni lavorativi, sia un elemento di criticità e causi code e ritardi. Si propone

l'acquisto di 8 nuove ruote al fine di effettuare un semplice scambio quando quelle in uso sono da riprofilare, per eseguire l'operazione al tornio in un secondo momento più scarico per l'officina. L'operazione di sostituzione viene stimata in 2 giorni lavorativi e il costo delle ruote è stimato pari a 7˙500 €/sala. Poiché molti convogli arrivano a riprofilatura in tempi circa uguali, è impossibile fare il giro-ruote su tutti ma si pianificano gli interventi in base allo scheduling generale. Si procede quindi dalla modifica dello scheduling prevedendo tempi ridotti come descritto in precedenza per i TTR 1, 2, 3, 5, 6, 7, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18 e 19. (Figura 108).

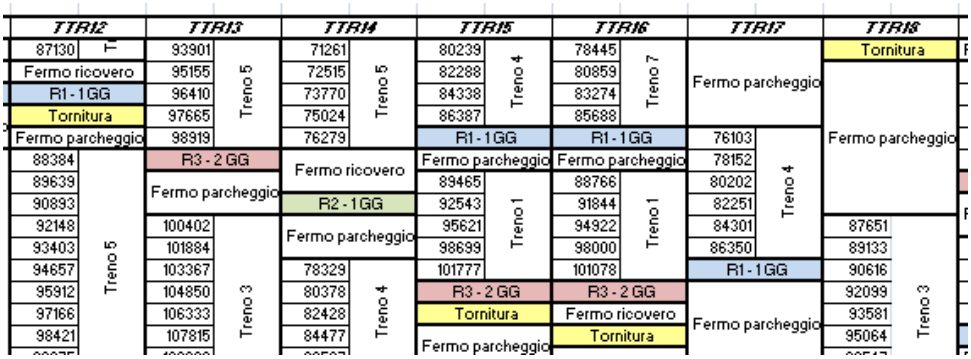


Figura 108 - Estratto dello scheduling con giro-ruote anziché riprofilatura

Ovviamente si modifica di conseguenza il calendario dell'officina (Tabella 56):

ID74	GTT	TTR17	R3	2O	20200921	20200923	TO	3O	20200923	20200925

Tabella 56 - Estratto calendario officina con giro-ruote. Operazione ID74 su TTR17 (settimana 39)

Analizzando i KPIs (Tabella 57) si nota una notevole diminuzione sia dei tempi di lavorazione sulle vie di manutenzione sia nella zona di ricovero.

Key Performance Index	*Scenario 0*	*Scenario 3*
Value Added Cost [h]	7728	5832
Wait Cost [h]	4272	1850
Total Cost [h]	12000	7680

Tabella 57 - Scenario n. 3: valori KPIs

Mettendo in evidenza i tempi sulle diverse risorse (Tabella 58) si nota una redistribuzione complessiva dei pesi tra le risorse, seppur rimane alto il tempo medio sul binario 3 (Figura 109):

Time per Entity	Average	Minimum Value	Maximum Value	Average	Minimum Value	Maximum Value
	Scenario 3					
VA Time per Entity	[gg]			[h]		
Binario 1	1,24	1,00	5,00	29,76	24,00	120,00
Binario 2	1,47	1,00	4,00	35,28	24,00	96,00
Binario 3	5,5	2,00	11,00	132,00	48,00	264,00
Binario Ricovero 1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Binario Ricovero 2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Binario Ricovero 3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Binario Ricovero 4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Binario Ricovero 5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Binario Ricovero 6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Binario Ricovero 7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Wait Time per Entity	[gg]			[h]		
Binario 1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Binario 2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Binario 3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Binario Ricovero 1	2,17	1,00	7,00	52,00	24,00	168,00
Binario Ricovero 2	3,29	1,00	6,00	78,86	24,00	144,00
Binario Ricovero 3	5,00	3,00	7,00	120,00	72,00	168,00
Binario Ricovero 4	2,50	2,00	3,00	60,00	48,00	72,00
Binario Ricovero 5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Binario Ricovero 6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Binario Ricovero 7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabella 58 - Scenario n. 3: Distribuzione media dei tempi sulle diverse risorse

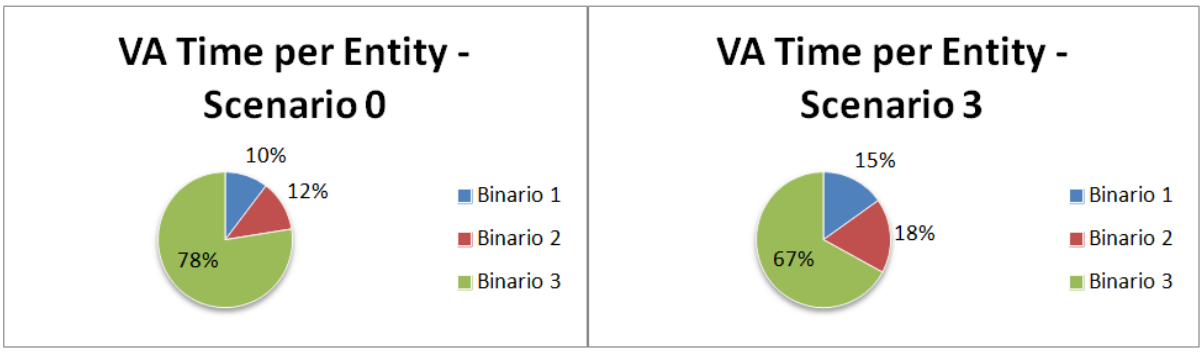


Figura 109 - Confronto VA Time medio tra lo scenario n. 0 e lo scenario n. 3

Il tempo accumulato (Tabella 58) viene notevolmente diminuito, passando da 187 h (scenario n.0) a 110 h (scenario n.4). Si stima un risparmio pari a:

$$(187 - 110)h \ * 48 \frac{€}{h} = 3{\cdot}696 \ €$$

Tale risparmio monetario è calcolato al solo fine di confronto con gli altri scenari; non costituirebbe infatti un vero risparmio in quanto gli operai verrebbero impiegati in altre mansioni.

Accumulated Time	Scenario 0		Scenario 3	
	[gg]	[h]	[gg]	[h]
Binario 1	72	1728	72	1728
Binario 2	63	1512	63	1512
Binario 3	187	4488	110	2640
Binario Ricovero 1	54	1296	39	936
Binario Ricovero 2	56	1344	23	552
Binario Ricovero 3	32	768	10	240
Binario Ricovero 4	23	552	5	120
Binario Ricovero 5	7	168	0	0
Binario Ricovero 6	6	144	0	0
Binario Ricovero 7	0	0	0	0

Tabella 59 - Scenario n. 3: tempo accumulato per l'anno 2020

Saranno ora analizzate le ripercussioni lato esercizio. Verificando la nuova disponibilità dei veicoli parcheggiati, incrementata dalle operazioni di manutenzione di durata minore, si ricalcola il CCT come visto all'inizio del *paragrafo 6.3*. Si confrontano i nuovi dati con i dati dello scenario n. 0 (Tabella 60):

Confronto CCT	Convogli parcheggiati		CCT		Confronto CCT	Convogli parcheggiati		CCT	
Giro Macchine	Scenario 0	Scenario 3	Scenario 0	Scenario 3	Giro Macchine	Scenario 0	Scenario 3	Scenario 0	Scenario 3
Settimana 1	5	5	1,42	1,42	Settimana 28	3	4	1,25	1,33
Settimana 2	6	6	1,50	1,50	Settimana 29	4	4	1,33	1,33
Settimana 3	7	7	1,58	1,58	Settimana 30	2	3	1,17	1,25
Settimana 4	8	8	1,67	1,67	Settimana 31	5	6	1,42	1,50
Settimana 5	6	6	1,50	1,50	Settimana 32	2	2	1,17	1,17
Settimana 6	5	5	1,42	1,42	Settimana 33	2	4	1,17	1,33
Settimana 7	7	7	1,58	1,58	Settimana 34	3	4	1,25	1,33
Settimana 8	6	6	1,50	1,50	Settimana 35	4	5	1,33	1,42
Settimana 9	3	3	1,25	1,25	Settimana 36	2	4	1,17	1,33
Settimana 10	5	6	1,42	1,50	Settimana 37	5	5	1,42	1,42
Settimana 11	4	5	1,33	1,42	Settimana 38	8	8	1,67	1,67
Settimana 12	8	8	1,67	1,67	Settimana 39	7	7	1,58	1,58
Settimana 13	6	6	1,50	1,50	Settimana 40	4	5	1,33	1,42
Settimana 14	6	6	1,50	1,50	Settimana 41	5	6	1,42	1,50
Settimana 15	5	6	1,42	1,50	Settimana 42	4	5	1,33	1,42
Settimana 16	5	6	1,42	1,50	Settimana 43	6	7	1,50	1,58
Settimana 17	4	5	1,33	1,42	Settimana 44	5	5	1,42	1,42
Settimana 18	2	2	1,17	1,17	Settimana 45	5	6	1,42	1,50
Settimana 19	5	6	1,42	1,50	Settimana 46	7	7	1,58	1,58
Settimana 20	6	7	1,50	1,58	Settimana 47	5	5	1,42	1,42
Settimana 21	5	6	1,42	1,50	Settimana 48	6	6	1,50	1,50
Settimana 22	4	5	1,33	1,42	Settimana 49	6	6	1,50	1,50
Settimana 23	3	4	1,25	1,33	Settimana 50	6	6	1,50	1,50
Settimana 24	4	6	1,33	1,50	Settimana 51	8	8	1,67	1,67
Settimana 25	5	6	1,42	1,50	Settimana 52	5	5	1,42	1,42
Settimana 26	4	5	1,33	1,42	Settimana 53	8	8	1,67	1,67
Settimana 27	3	4	1,25	1,33					

Tabella 60 - Confronto CCT tra lo scenario n. 0 e lo scenario n. 3

Graficamente dalla Tabella 60 si ottiene:

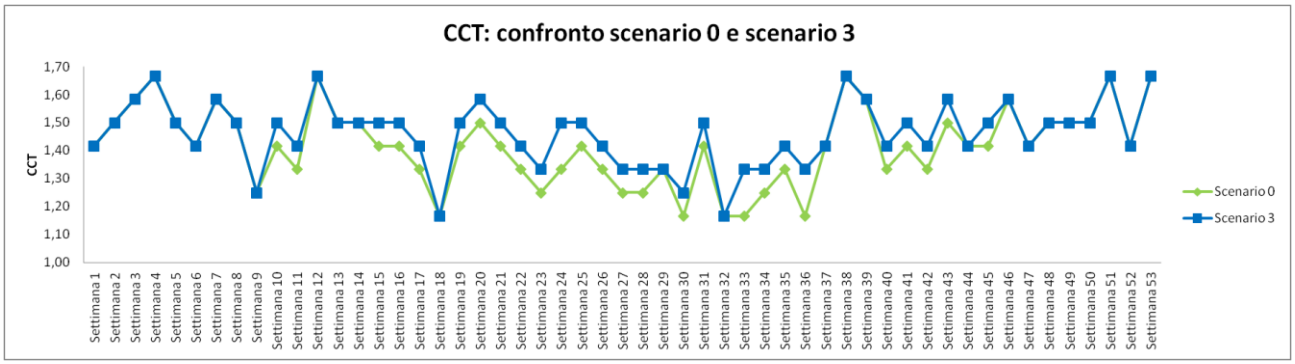


Figura 110 - Confronto CCT tra lo scenario n. 0 e lo scenario n. 3

Si noti in Figura 110 che nelle parti iniziali e terminali dell'anno dove non esiste il problema della coda per riprofilatura delle ruote, gli effetti sono pressoché nulli. Nella parte centrale dell'anno, indicativamente tra le settimane 19 e 36, gli effetti sono accentuati poiché si concentrano in questo periodo più torniture contemporaneamente. Ciò significa che l'investimento porta dei benefici anche lato esercizio solo se i convogli maturano scadenze di manutenzione pressoché simili. Al contrario, laddove il materiale rotabile si differenzia notevolmente per uso e la politica di tornitura rimane un'attività non programmata ma affidata a valutazioni sporadiche (vedi *capitolo 4* per maggiori dettagli), l'attività è posticipabile e gli effetti del giro-ruote vengono percepiti in modo minore. L'adozione della seconda politica tuttavia porta con sé grande incertezza nei lavori programmabili e una gestione delle risorse dell'officina volta sempre a breve termine.

Si ripercorrono ora i passaggi effettuati per il calcolo del numero di convogli che l'officina può aggiungere alla propria schedulazione, come proposto alla fine del *paragrafo 6.3.1*. Con l'investimento proposto nello scenario n. 3, si trova che in media un convoglio necessita di 9 giorni di lavorazione in officina. Dalla simulazione si trova che i giorni occupati per lavorazioni in un anno è di 172 giorni, per differenza con i 301 giorni lavorativi annui si ottengono 129 giorni liberi da lavorazioni nelle vie di manutenzione. Il numero di convogli che l'impianto riuscirebbe a sostenere in più sono:

$$N.convogli\ aggiuntivi = int\left(\frac{129}{9}\right) = 15\ convogli$$

Tale valore è notevolmente aumentato rispetto il valore unitario trovato nello scenario n. 0.

6.3.5. Scenario n. 4: investimento di una passerella per la manutenzione ordinaria

Lo scenario n. 4 propone l'analisi degli effetti dell'investimento di una nuova passerella al fine di eseguire le manutenzioni ordinarie (Figura 111). In particolare si tratta di attrezzare il binario 3 dell'officina, fin'ora usato solo per la tornitura, al fine di eseguire gli interventi di manutenzione sul tetto del convoglio, necessità descritta nel *paragrafo 1.4*. L'intervento consiste non solo nell'acquisto della passerella ma anche nell'allungamento dell'armamento al fine di ospitare l'intera lunghezza del convoglio. Si stimano i seguenti costi (Tabella 61):

Voce di costo	**Costo [€]**
Armamento	200˙000
Carro-ponte	70˙000
Totale:	270˙000

Tabella 61 - Investimento monetario scenario n. 4

Figura 111 - Carro-ponte pedonale per la manutenzione ordinaria (Fonte: Officina GTT)

Analizzando i KPIs (Tabella 62) si nota una diminuzione dei tempi di ricovero dovuta allo spostamento di alcuni convogli sul binario 3 qualora fosse libero, tuttavia il tempo

complessivo delle lavorazioni di officina rimane invariato poiché non cambia il numero di operazioni da svolgere.

Key Performance Index	Scenario 0	Scenario 4
Value Added Cost [h]	7728	7728
Wait Cost [h]	4272	3888
Total Cost [h]	12000	11616

Tabella 62 - Scenario n. 4: KPIs

Analizzando le singole risorse (Tabella 63) si nota una diminuzione dei tempi medi di lavorazione sul binario 3 in quanto ora non ospita solo le torniture di lunghe durate ma anche brevi interventi quali gli R1 e gli R2. Comunque resta di notevole impatto sulla durata l'intervento di riprofilatura delle ruote.

Time per Entity	Average	Minimum Value	Maximum Value	Average	Minimum Value	Maximum Value	Average	Minimum Value	Maximum Value	Average	Minimum Value	Maximum Value
	Scenario 0						Scenario 4					
VA Time per Entity	[gg]			[h]			[gg]			[h]		
Binario 1	1,24	1,00	5,00	29,79	24,00	120,00	1,23	1,00	5,00	29,52	24,00	120,00
Binario 2	1,47	1,00	4,00	35,16	24,00	96,00	1,46	1,00	4,00	35,04	24,00	96,00
Binario 3	9,35	10,00	12,00	224,40	240,00	288,00	7,42	1,00	12,00	178,08	24,00	288,00
Binario Ricovero 1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Binario Ricovero 2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Binario Ricovero 3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Binario Ricovero 4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Binario Ricovero 5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Binario Ricovero 6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Binario Ricovero 7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Wait Time per Entity	[gg]			[h]			[gg]			[h]		
Binario 1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Binario 2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Binario 3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Binario Ricovero 1	2,70	1,00	10,00	64,80	24,00	240,00	3,07	1,00	10,00	73,68	24,00	240,00
Binario Ricovero 2	7,00	1,00	14,00	168,00	24,00	336,00	7,00	2,00	14,00	168,00	48,00	336,00
Binario Ricovero 3	6,40	3,00	9,00	153,60	72,00	216,00	5,40	2,00	9,00	129,60	48,00	216,00
Binario Ricovero 4	7,67	2,00	14,00	184,00	48,00	336,00	7,66	1,00	14,00	183,84	24,00	336,00
Binario Ricovero 5	7,00	7,00	7,00	168,00	168,00	168,00	7,00	7,00	7,00	168,00	168,00	168,00
Binario Ricovero 6	6,00	6,00	6,00	144,00	144,00	144,00	6,00	6,00	6,00	144,00	144,00	144,00
Binario Ricovero 7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabella 63 – Confronto scenario n. 0 e n. 4: analisi delle singole risorse

Di maggiore interesse è la Tabella 64: si nota che l'investimento è significativo qualora l'obiettivo dell'azienda sia quello di ridurre il numero di veicoli in coda. Poiché il problema principale non è nella zona di ricovero ma nelle vie di manutenzione, come visto nello scenario n. 0 (*paragrafo 6.3.1*), l'investimento risulta meno significativo rispetto quello proposto nello scenario n. 3 (*paragrafo 6.3.4*).

Accumulated Time	Scenario 0		Scenario 4	
	[gg]	[h]	[gg]	[h]
Binario 1	72	1728	64	1536
Binario 2	63	1512	63	1512
Binario 3	187	4488	195	4680
Binario Ricovero 1	54	1296	52	1248
Binario Ricovero 2	56	1344	57	1368
Binario Ricovero 3	32	768	31	744
Binario Ricovero 4	23	552	15	360
Binario Ricovero 5	7	168	7	168
Binario Ricovero 6	6	144	6	144
Binario Ricovero 7	0	0	0	0

Tabella 64 – Scenario n. 0 e n. 4: tempi accumulati di lavorazione

Il valore del CCT non ha variazioni significative rispetto allo scenario base e l'investimento proposto non porta significativi benefici all'esercizio in quanto nell'anno la disponibilità aggiuntiva cumulata dei convogli rilasciati prima dall'officina è di soli 6 giorni.

Lo scenario è comunque interessante qualora l'azienda finanzi anche l'acquisto di un tornio in fosse, del valore complessivo di 1˙000˙000 €. Tale acquisto equivale all'unione degli scenari n. 3 e n. 4 portando i benefici di entrambi e riuscendo ad agire contemporaneamente sull'abbattimento dei tempi di tornitura delle ruote e quindi di occupazione delle risorse in officina (scenario n. 3), sulla diminuzione della coda nella zona di ricovero (scenario n. 4) e avendo benefici anche lato esercizio (scenario n. 3).

6.3.6. Confronto tra scenari e conclusioni

Si riportano ora i costi, espressi in ore di occupazione delle risorse, relativi agli scenari analizzati precedentemente (Figura 112 e Figura 113).

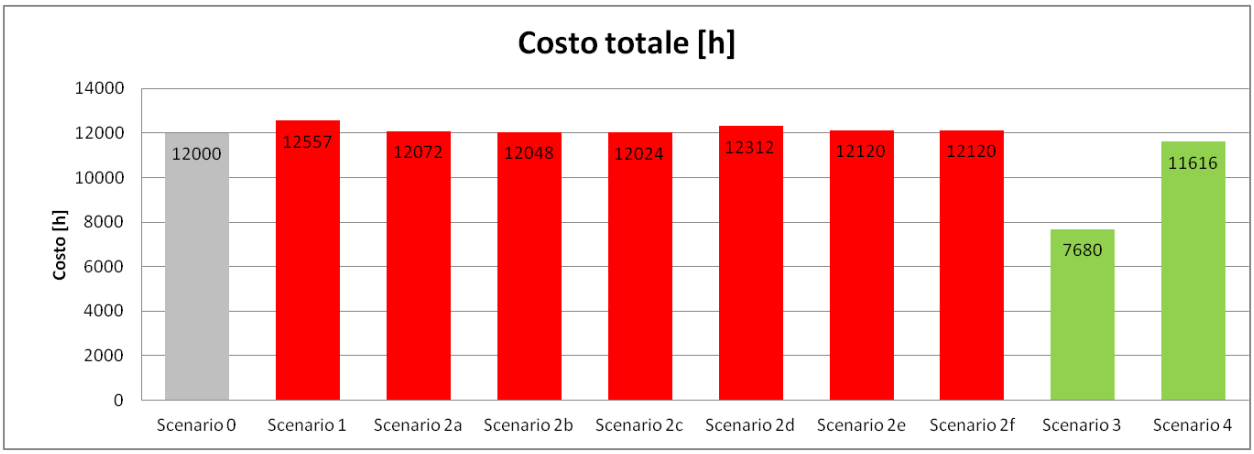


Figura 112 - Confronto tra scenari: costo totale. In grigio lo scenario base (n.0), in rosso gli scenari rappresentanti eventi imprevisti, in verde gli scenari riferiti a situazioni migliorative.

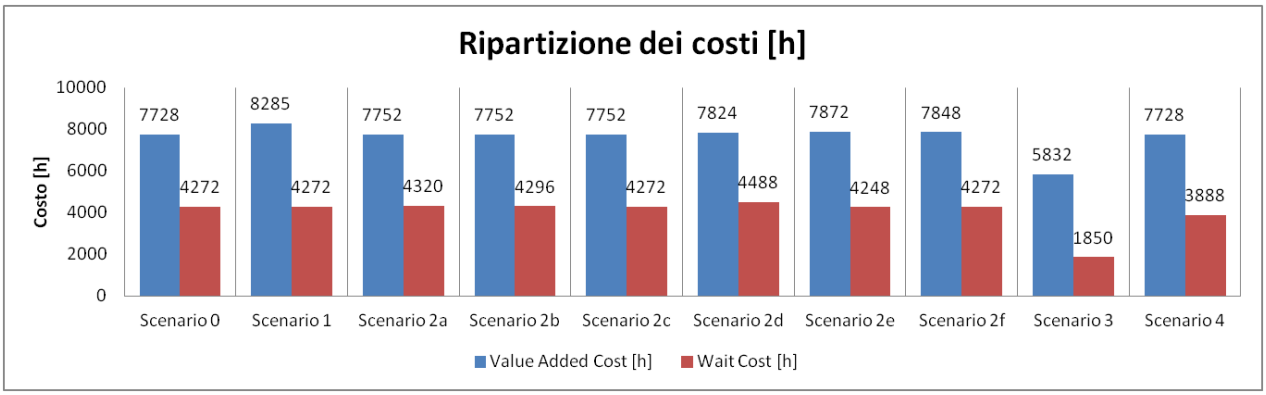


Figura 113 - Confronto tra scenari: ripartizione dei costi

Rispetto allo scenario base (n.0), lo scenario imprevisto più significativo per l'azienda è rappresentato dallo scenario n.1 (come si vede in Figura 112), ovvero la valutazione di ritardi periodici dell'officina. Di conseguenza si suggerisce all'impresa di porsi come obiettivo la minimizzazione dei ritardi nelle lavorazioni. Tenendo traccia dei motivi dei ritardi, l'azienda può operare in maniera puntuale sui singoli problemi derivanti principalmente o da carenza del personale o da una carenza di risorse. Come si vede dalla Figura 113, l'aumento di tempo di lavorazione ricade interamente lato officina, non intaccando la zona di ricovero: la simulazione permette perciò di identificare la parte delle risorse interessate dalle variazioni sul programma e fornisce una risposta su dove operare nel sistema al fine di minimizzare le perdite.

Tra gli scenari di guasto (n.2) apparentemente la situazione peggiore è rappresentata dal guasto nel giorno peggiore per l'esercizio (n.2d): si dimostra un'altra volta come i due reparti dell'azienda non possono operare separatamente ma è necessaria una visione d'insieme e un'interfaccia informatica che possa far dialogare l'Esercizio e la Manutenzione. L'incremento dei tempi viene comunque ripartito tra zona di ricovero e vie di manutenzione, rendendo tale scenario meno problematico rispetto allo scenario n.2e in cui il guasto avviene nel giorno peggiore per la manutenzione. Qui, anche se l'incremento complessivo è minore, il singolo aumento di lavorazione nelle vie di manutenzione risulta maggiore rispetto al precedente causando disagi maggiori a causa della scarsità delle risorse. Inoltre lo scenario n.2e, come visto in precedenza, porta con sé problematiche maggiori se viene valutata la resilienza.

Con questo esempio si dimostra come la simulazione ad eventi discreti fornisca una visione più chiara su dove impattano gli eventi sui diversi processi dell'azienda, motivando i processi decisionali e orientando la pianificazione integrata tra parti diverse dell'impresa. Tra gli scenari propositivi, come visto nel *paragrafo 6.3.4* e *6.3.5,* il vantaggio maggiore è rappresentato dallo scenario n.3 in cui i benefici maggiori sono considerati sia lato esercizio sia lato manutenzione. Un ulteriore vantaggio della simulazione ad eventi discreti è perciò la quantificazione dei miglioramenti attesi a seguito di un investimento e il confronto tra investimenti diversi.

6.3.7. Sviluppi futuri del programma di simulazione

Il modello qui proposto costituisce una fase embrionale di un progetto più completo ed articolato. Il fine ultimo degli sviluppi futuri sarà la creazione di un catalogo che permetta

all'azienda di operare in maniera rapida di fronte ad un evento imprevisto, avendo già simulato in precedenza numerosi scenari. Per un'ulteriore sviluppo futuro si forniscono ora alcuni spunti utili al fine di futuri sviluppi del programma proposto nel precedentemente *paragrafo 6.2.3*.

1. *Diminuzione delle entità generate dal software:* la prima proposta di miglioramento, di carattere computazionale, consiste nella simulazione di un minor numero di convogli attraverso la generazione di un numero di convogli pari al totale di quelli a disposizione e il riciclo di essi ad ogni ciclo. Essi, al giorno corretto, possono entrare nel ciclo di manutenzione e, una volta finito, tornare al punto di origine ed attendere in un modulo *Hold* fino al successivo intervento richiesto. La fine dell'esecuzione della simulazione non verrà più sancita con la fine delle entità, come avviene nel programma proposto, ma con la fine della schedulazione letta. Si elimina il modulo in cui vengono ignorate le schedulazioni prive di intervento. In questa proposta si può mantenere la pianificazione proposta come in Figura 86 oppure è possibile creare delle schede di attività per ogni convoglio. La proposta risulta valida qualora si considerassero flotte più numerose: in questo caso la complessità e la probabilità di errore da parte dell'impresa nella generazione della schedulazione aumenterebbe; perciò è utile avere situazioni diversificate da convoglio a convoglio e studiarle separatamente. Verrebbe inoltre semplificata la compilazione delle tabelle e perciò renderebbe accessibile a più utenti l'esecuzione della simulazione. Al contempo, con questa soluzione, risulta più difficile identificare gli *slot* liberi per eventuali inserimenti di guasti o interventi non pianificati: tale operazione risulta agevole nella simulazione proposta dove si possiede un foglio Excel con gli slot vuoti settimanalmente.

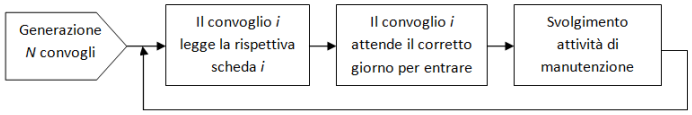


Figura 114 – Schema della 1^a proposta di miglioramento: diminuzione della generazione delle entità

2. *Utilizzo della funzione temporale del software:* la seconda proposta di miglioramento riguarda l'utilizzo della variabile di Arena *TNOW* la quale tiene in considerazione il

tempo del modello. È possibile associare questa variabile alle entità e confrontarla con il tempo di schedulazione per l'entrata in officina.

3. *Unificazione dei documenti di Excel*: la terza proposta di miglioramento consiste nell'esecuzione della proposta 1, facendo tuttavia leggere ai convogli la rispettiva colonna di programmazione del giro macchine proposta in Figura 86 (A e B). In tal modo il programma aggiunge alla parte di manutenzione in officina anche la parte di esercizio. Il convoglio, letta la rispettiva cella per la settimana corrente, è instradato o in officina o in linea e svolge per l'intera settimana l'attività proposta . Il processo può essere anche eseguito su scala giornaliera, appesantendo la pianificazione del giro macchine ma rendendo possibile modifiche puntuali su guasti o interventi non pianificati. La proposta comprende un programma maggiormente completo e strutturato, elimina la generazione di documenti e fogli elettronici da parte del progettista che si occupa solamente del giro macchine, tuttavia senza avere completa padronanza delle pianificazione dell'officina. Tale sistema, utile anche in caso di dialogo con ulteriori programmi di schedulazione, ha bisogno di personale esperto nella gestione e comprensione del file Arena in modo da operare celermente nelle variazioni di programma e interpretando in modo corretto i risultati forniti dalla simulazione. È necessaria comunque una pianificazione manuale delle operazioni di movimentazione di officina al fine di comunicare al DM[18] le precise attività della settimana, compresi i binari di partenza e arrivo da e verso l'officina. Questa proposta comprende l'intero diagramma di flusso in Figura 89, automatizzando l'intero processo e fornendo ulteriori possibilità di sviluppo del programma. Uno sviluppo interessante di questa proposta è la gestione delle priorità dei lavori all'interno del software Arena rispetto l'attuale progettazione nel foglio di calcolo Excel.

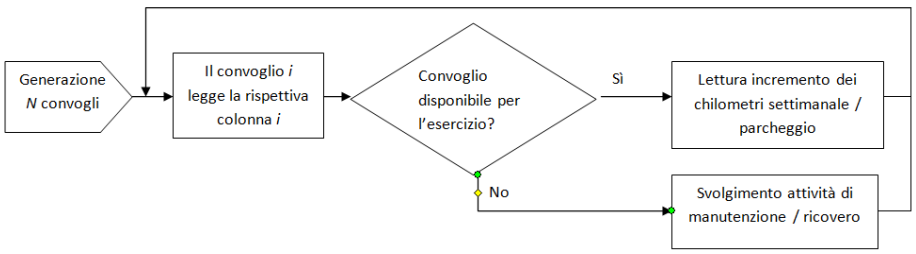


Figura 115 - Schema della 3^a proposta di miglioramento: unione dell'esercizio e della manutenzione in Arena

[18] DM : Dirigente di Movimento (*capitolo 2*)

Conclusioni

La gestione del servizio ferroviario locale necessita di una sinergia tra le diverse competenze e i campi di applicazione al fine di garantire un trasporto efficiente. Prendendo in considerazione la Ferrovia Canavesana gestita dal Gruppo Torinese Trasporti, nell'ambito della presente tesi viene innanzitutto dimostrata l'importanza della revisione normativa oggi in atto da parte di ANSF e l'incidenza che essa ha sullo svolgimento dell'esercizio ferroviario. L'approfondimento proposto permette di evidenziare la necessità da parte delle aziende di una profonda conoscenza dei testi normativi e tecnici al fine di garantire un servizio passeggeri di alta qualità. L'innalzamento del livello di sicurezza proposto dall'Agenzia comporta ricadute su tutti gli ambiti interessati nell'erogazione del servizio e le imprese sono consapevoli che bisogna introdurre dei cambiamenti consistenti per rimanere competitivi sul mercato innalzando complessivamente la qualità e soddisfare le esigenze della clientela. In questo nuovo scenario la sicurezza, la qualità dell'offerta commerciale e l'ammodernamento dei sistemi di manutenzione e controllo diventano elementi essenziali di competitività. La disponibilità di un sistema efficiente ed efficace di manutenzione del materiale rotabile potrà costituire in futuro un fattore decisivo per il contenimento dei costi con standard qualitativi e di sicurezza elevati. Nell'ambito del presente lavoro viene documentata la stretta connessione tra l'esercizio e la manutenzione, due ambiti aziendali che necessitano di una crescente comunicazione e di mezzi per dialogare al fine di operare in sinergia verso gli obiettivi comuni, considerando i vincoli derivanti dalle mutue esigenze.

La questione della manutenzione è un problema attuale, rilevante sia dal punto di vista della sicurezza sia da quello economico. Si è visto come un elemento apparentemente banale come la durata del ciclo manutentivo richieda riflessioni e studi accurati per essere stabilito in modo ottimale. È da notare inoltre la rilevanza del numero di convogli disponibili confrontato con quelli necessari e lavorati per ogni intervento manutentivo. Il costo manutentivo subisce variazioni sostanziali al variare di questi fattori, evidenziando l'importanza del contesto in cui si realizza la manutenzione. Nella letteratura citata gli autori sviluppano modelli legati principalmente ad elementi tecnici del materiale rotabile descrivendone l'usura per esercizio. Tali modelli rimangono spesso privi di un'applicazione pratica e risultano insufficienti a garantire una buona riuscita del programma manutentivo proposto. Da qui si deduce

l'importanza di calare nel contesto reale quanto teorizzato dal punto di vista analitico, al fine di realizzare ed affinare modelli che risultino applicabili. Uno degli obiettivi raggiunti in questa Tesi è quello di fornire un modello manutentivo di pratica applicazione, in grado di recepire il crescente ritorno di esperienza nella gestione del materiale rotabile. L'applicazione svolta fa riferimento al processo di riprofilatura delle ruote, fornendo una possibile soluzione alle difficoltà riscontrate nell'azienda oggetto di studio della presente Tesi. Questa opportunità è servita come dimostrazione della fattibilità di attuazione del modello e della coerenza dei risultati da esso forniti. Più in generale, nel presente lavoro di Tesi viene fornito un modello in grado di coprire una vasta gamma di casistiche delle attività manutentive e dei diversi componenti, laddove le trame non sono accurate o presentano delle lacune.

La coordinazione tra i due reparti dell'azienda permette di non compromettere la normale programmazione a fronte di eventi imprevisti. In questa Tesi sia la schedulazione sia la rischedulazione delle attività di manutenzione sono state analizzate tramite l'implementazione di un modello di simulazione in Arena. Il modello elaborato riceve in input la programmazione dell'esercizio e dell'officina di manutenzione ed fornisce in output l'utilizzazione delle risorse disponibili. Numerosi scenari sono stati analizzati tenendo in considerazione anche il possibile verificarsi di eventi imprevisti. I risultati ottenuti dall'analisi degli scenari hanno messo in evidenza come la simulazione ad eventi discreti possa rappresentare un valido strumento di supporto decisionale per poter effettuare scelte ottimali nell'ambito della manutenzione ferroviaria. Inoltre il modello proposto consente di creare un'interfaccia efficace tra gli ambiti dell'Esercizio e della Manutenzione, favorendone il dialogo necessario per incrementare la qualità dell'organizzazione logistica interna e del servizio offerto agli utenti finali. Inoltre, la possibilità di simulare eventi non prevedibili permette all'azienda di poter studiare in anticipo possibili azioni correttive e assumere comportamenti cautelativi fin dalla fase di progettazione degli interventi di manutenzione, oltre che di poter disporre di un sistema celere nella risposta agli imprevisti che possono presentarsi.

L'approccio simulativo presentato pone le basi per l'evoluzione del settore manutentivo ferroviario sempre più verso una manutenzione di tipo predittivo, permettendo agli operatori di comprendere l'andamento dell'usura dei convogli e rimodulare i cicli manutentivi in base alle reali esigenze di intervento. Lo strumento di simulazione sviluppato diventa necessario

nel momento in cui lo si affianca alla capacità di effettuare una diagnostica predittiva sui treni di nuova generazione.

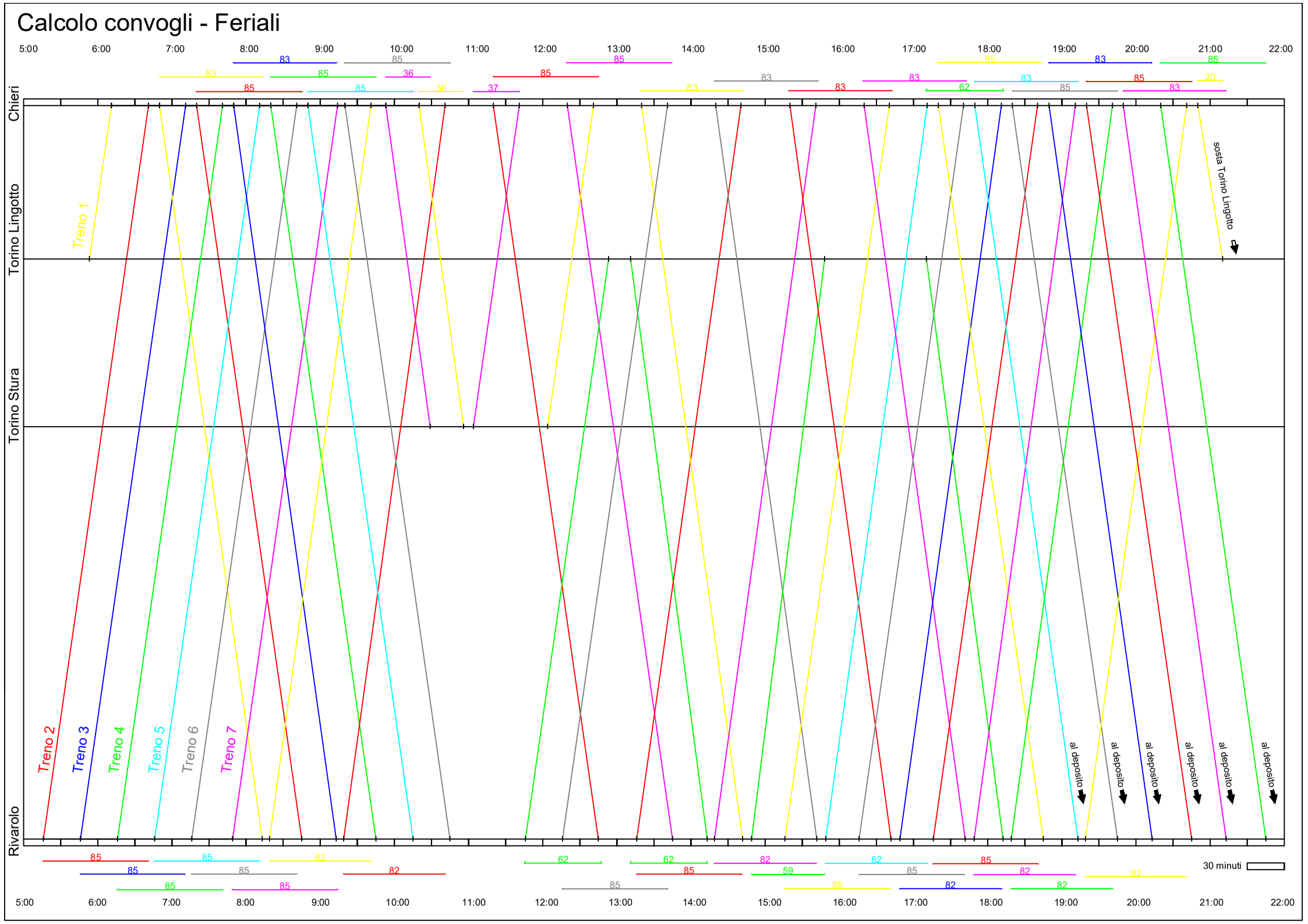
L'attuale sviluppo tecnologico del materiale rotabile, in grado di consentire una sempre più accurata diagnostica di bordo e una capacità di analisi da remoto delle condizioni operative, dovrà sempre più integrarsi con strumenti informatici come quello proposto nell'ambito della presente Tesi. Si propone quindi uno sviluppo futuro volto a incrementare il dialogo tra gli strumenti di simulazione ad eventi discreti e gli attuali sistemi di gestione del materiale rotabile ad uso delle aziende per permettere in tempo reale di verificare le scelte da effettuare e comprendere le ricadute in una visione più generale.

Allegati

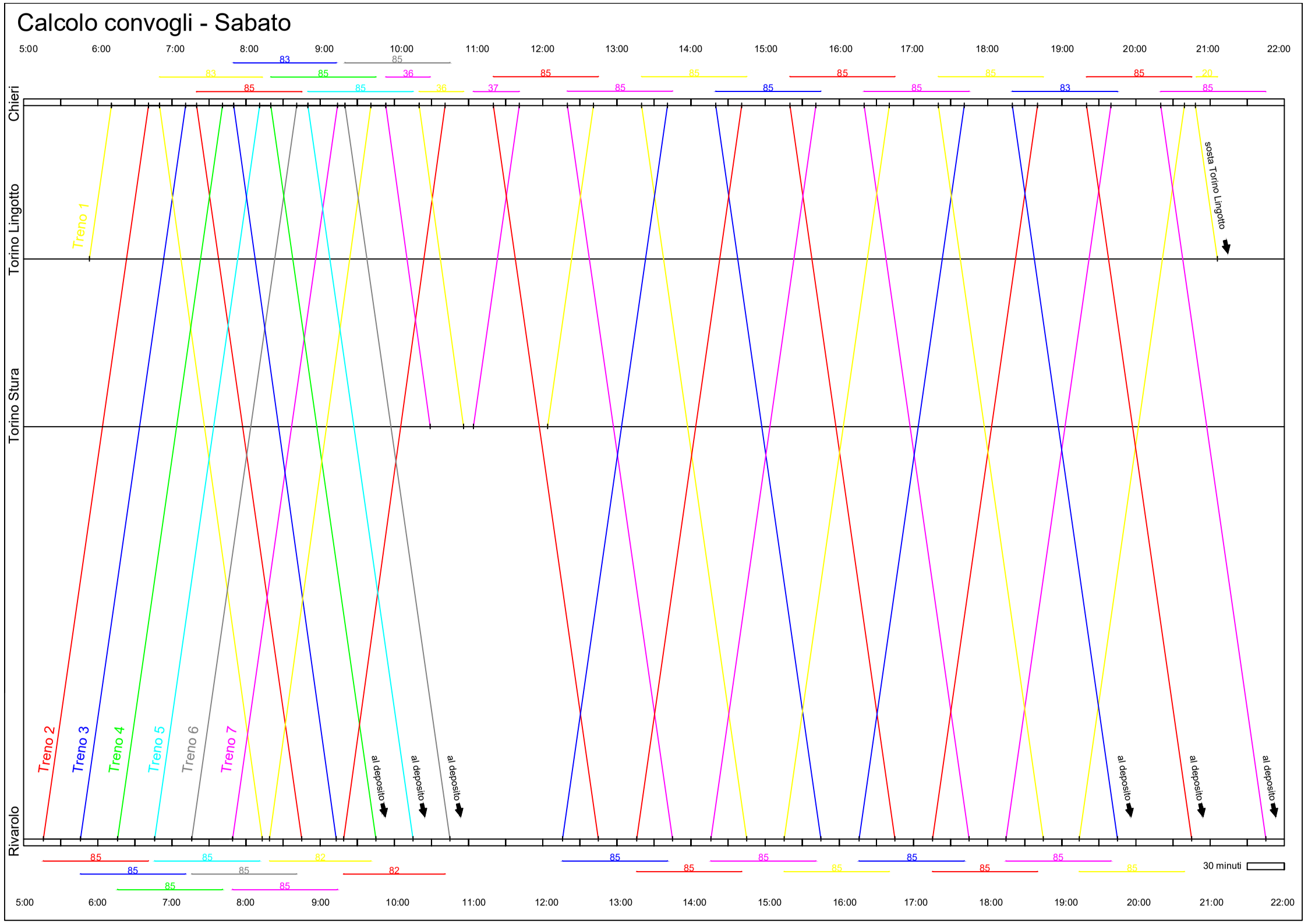
- *Allegato A*: Calcolo dei convogli dall'orario grafico (giorno feriale, sabato, domenica);
- *Allegato B*: Fiancate principali e di linea unificate e semplificate Rivarolo – Chieri;
- *Allegato C*: Piantina dell'officina di Rivarolo;

ALLEGATO A: Calcolo dei convogli dall'orario grafico

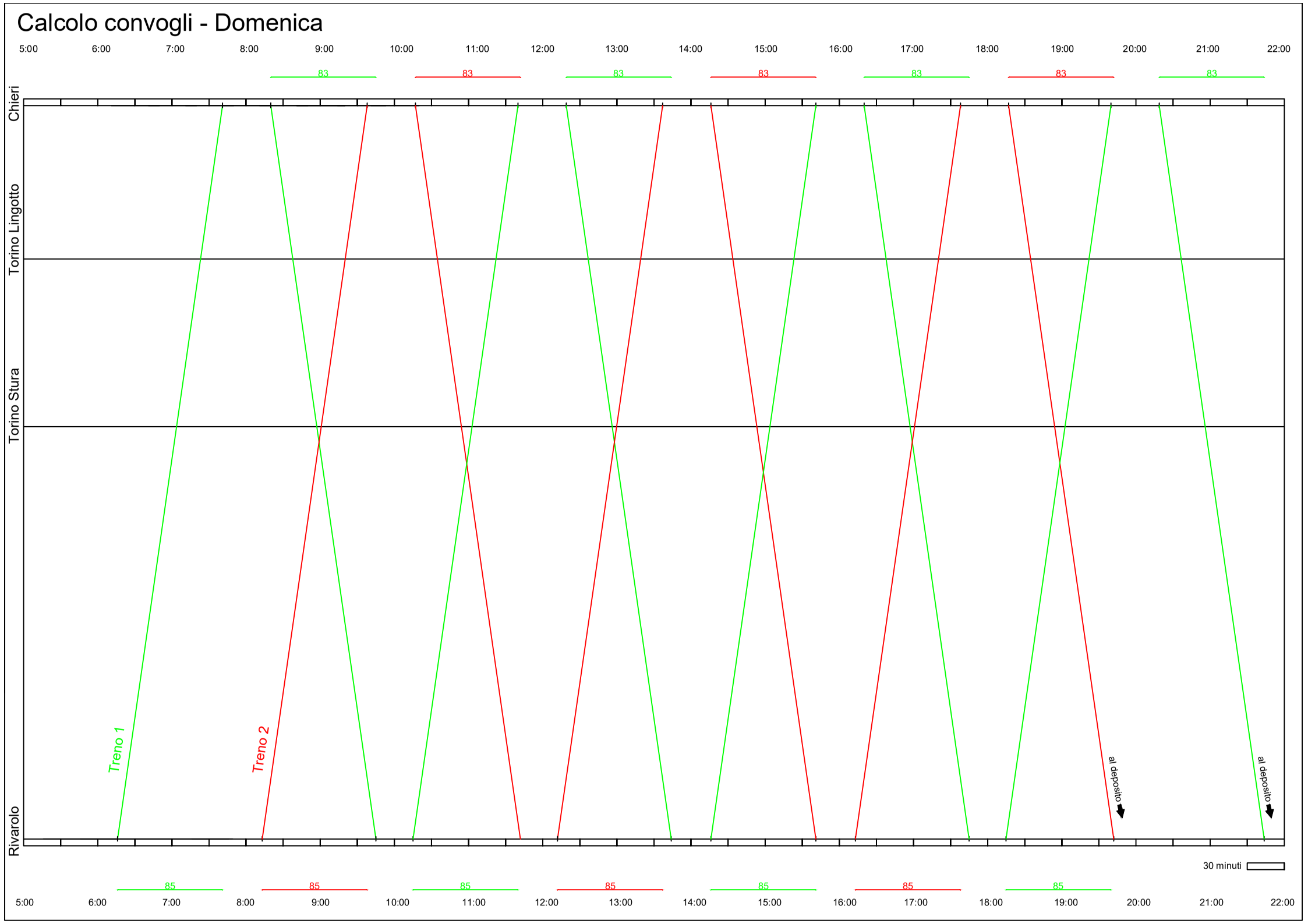
Calcolo convogli - Feriali



Calcolo convogli - Sabato



Calcolo convogli - Domenica



ALLEGATO B: Fiancate principali e di linea unificate e semplificate Rivarolo – Chieri

Fiancata di linea - Rivarolo → Chieri

Grado di frenatura	Velocità max [km/h] A	B	C	P	Progressiva Chilometrica	Località di Servizio
IV					22,08	**RIVAROLO**
	50	50				
III					18,94	**Feletto**
	50	50			14,66	**Bosconero**
II					8,95	**San Benigno**
I					6,91	**Volpiano**
	50	50				
						Raccordo ENI km 3,900
	30	30				
					0,00	**SETTIMO T.SE**
I_4	100	100	100	100		
I_2	140	145	155	160		
						TORINO STURA
						Rebaudengo
V	100	110	120	140		
						TORINO PORTA SUSA
	80	85	90	100		
						TORINO LINGOTTO
	140	160	160	160		
I_4						**Moncalieri**
I_3						**TROFARELLO**
						Chieri

Fiancata principale - Rivarolo → Chieri

Grado di Prestazione	Ascesa [per mille]	Progressiva chilometrica	Distanze parziali	LOCALITA' DI SERVIZIO	Posti di blocco	Indicazioni di servizio	Numero e Capacità de binari
1	0	22+077	-	**RIVAROLO**	6		Vari (254 - 170)
		18+940	3,137	**Feletto**	5		1 (289)
	1	14+660	4,280	**Bosconero**	4		1 (217)
10	8	8+950	0,078	**San Benigno**	3		1 (164)
1	3	6+910	2,040	**Volpiano**	2		1 (185)
		3+990	1,730	Raccordo ENI km 3,900			
6		0+000	3,990				1 (250)
7		17+673	0,000	**SETTIMO**	318		(632)
11							
4	9	12+845	4,828	TORINO STURA	314		(650-475)
11	0	9+359	3,486	**Rebaudengo**	310		-
9	0	5+850	3,509	TORINO PORTA SUSA	806		-
1	0	[4+318] 0+000	1,532	**TORINO LINGOTTO**	105		(610-135)
2	4	[8+010] 3+692	3,692	**Moncalieri**	411		(687-621)
	5	[13+030] 8+712	5,020	**TROFARELLO**	121		
		[21+594] 17+276		*Chieri*			

Fiancata di linea - Chieri → Rivarolo

Grado di frenatura	Velocità max [km/h] A	B	C	P	Progressiva Chilometrica	Località di Servizio
III						*Chieri*
I						**TROFARELLO**
						Moncalieri
I	140	160	160	160		**TORINO LINGOTTO**
I_2	80	85	90	100		TORINO PORTA SUSA
II	100	110	120	140		**Rebaudengo**
IV						TORINO STURA
	140	145	155	160		
	100	100	100	100		
I					0,00	**SETTIMO T.SE**
	30	30				
						Raccordo ENI km 3,900
	50	50				
					6,91	**Volpiano**
II					8,95	**San Benigno**
I_3					14,66	**Bosconero**
	50	50				
					18,94	**Feletto**
I_4	30	30				
					22,08	**RIVAROLO**

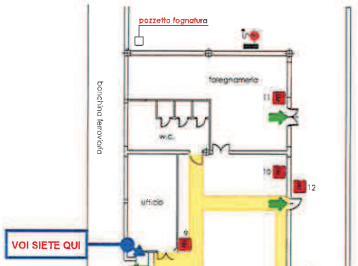
Fiancata principale - Chieri → Rivarolo

Grado di Prestazione	Ascesa [per mille]	Progressiva chilometrica	Distanze parziali	LOCALITA' DI SERVIZIO	Posti di blocco	Indicazioni di servizio	Numero e Capacità de binari
2	5	17+276 [21+594]		*Chieri*			
1	4	8+712 [13+030]	5,020	**TROFARELLO**	121		
	0	3+692 [8+010]	3,692	**Moncalieri**	411		(687-621)
9		0+000 [4+318]	1,532	**TORINO LINGOTTO**	105		(610-135)
	0						
11		5+850	3,509	TORINO PORTA SUSA	806		-
4	0						
11	9	9+359	3,486	**Rebaudengo**	310		-
		12+845	4,828	TORINO STURA	314		(650-475)
9	5	17+673 0+000	0,000 3,990	**SETTIMO**	318 1		(632) (250)
1	3	3+990	1,730	Raccordo ENI km 3,900			
8	7	6+910	2,040	**Volpiano**	2		1 (185)
13	10	8+950	0,078	**San Benigno**	3		1 (164)
12	11	14+660	4,280	**Bosconero**	4		1 (217)
13	12	18+940	3,137	**Feletto**	5		1 (289)
		22+077	-	**RIVAROLO**	6		Vari (254 - 170)

ALLEGATO C: Piantina dell'officina di Rivarolo

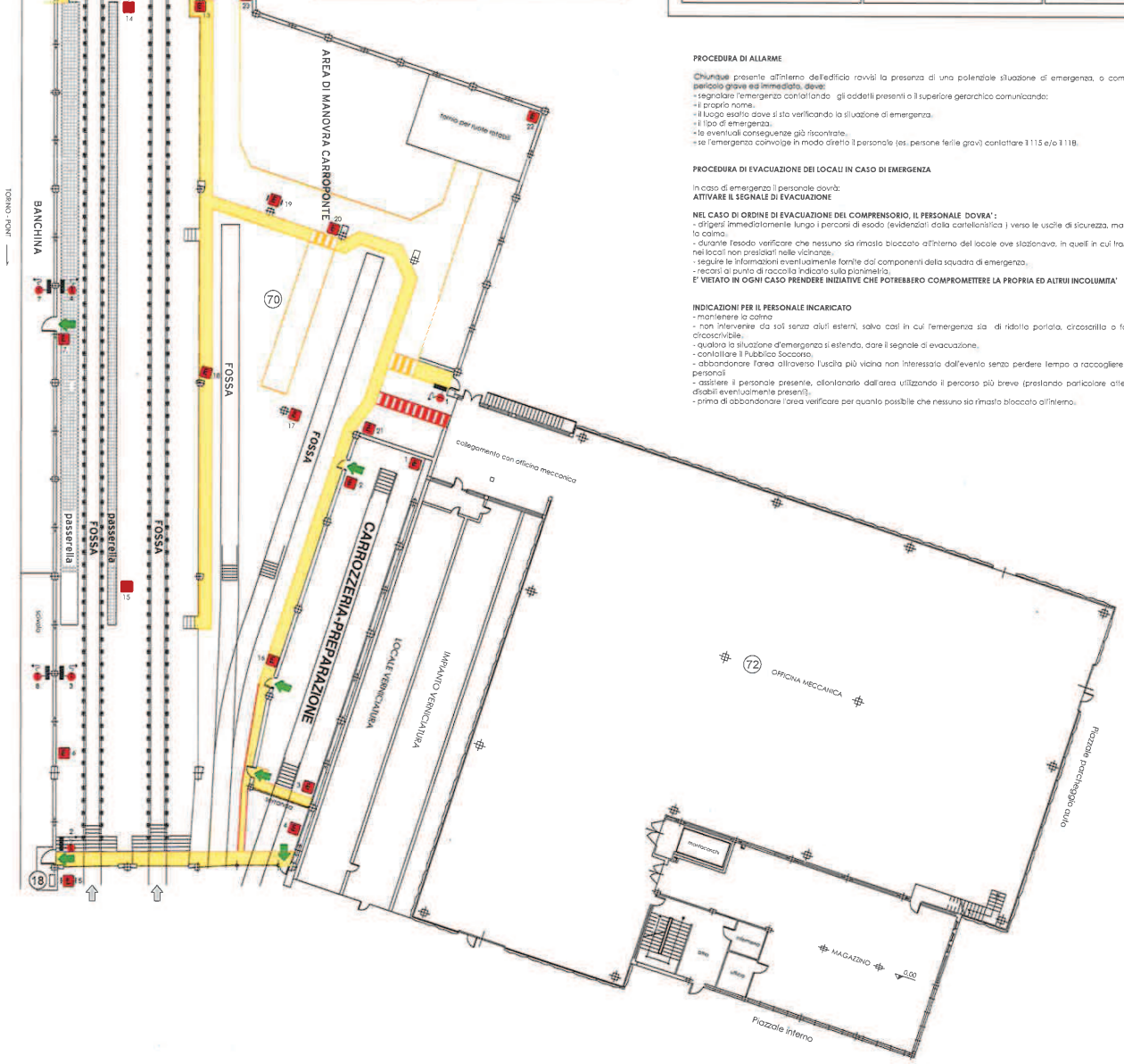
EDIFICI	DESCRIZIONE
A	OFFICINA MANUTENZIONE AUTOBUS
B	OFFICINA MECCANICA ED UFFICI
C	OFFICINA FERROVIARIA
D	IMPIANTO DISTRIBUZIONE CARBURANTE
E	CAPANNONE LAVAGGIO AUTOBUS
F	STAZIONE FERROVIARIA
G	PALAZZINA EX UFFICI MOVIMENTO
H	IMPIANTO DEPURAZIONE ACQUE REFLUE
I	MAGAZZINO OLI E BATTERIE
L	DEPOSITO BOMBOLE
M	PIAZZALE DI PERTINENZA
N	LAVAGGIO TRENI

INDIVIDUAZIONE ATTIVITA'	
(72)	OFFICINA MECCANICA
(70)	OFFICINA FERROVIARIA



SIMBOLI GRAFICI DI PREVENZIONE INCENDI

CARTELLONISTICA DI SICUREZZA



GRUPPO TORINESE TRASPORTI S.p.A.
DIREZIONE METROFERRO - ESERCIZIO FERROVIE
SICUREZZA AMBIENTE ENERGIA

COMPRENSORIO DI RIVAROLO
AREA OFFICINE
VIA BONIFACIO 20 - RIVAROLO

PIANO DI EVACUAZIONE

PLANIMETRIA GENERALE E OFFICINA FERROVIARIA - pianta

COD. ELABORATO: PEFRI – ES – DS – [ ] – 00 – 01 | SCALA: varie | FORMATO ELABORATO: 700X500 mm

REV.	DATA	MOTIVO DELL'EMISSIONE	ESEGUITO	CONTROLLO	APPROVATO
	5/2013		IACOMUZZO	SECCATORE	TORTORA

POSIZIONE ARCHIVIO

REDATTO DAL SETTORE DIREZIONE METROFERRO ESERCIZIO FERROVIE	CONTROLLATO DAL SETTORE QUALITA' AMBIENTE SICUREZZA ENERGIA	IL RESPONSABILE DEL SITO E DELLA GESTIONE OPERATIVA
ING. GIOVANNI PERASSA	ING. ANDREA TORTORA	ING. LUCA FRONDUTI

PROCEDURA DI ALLARME

Chiunque presente all'interno dell'edificio rawisi la presenza di una potenziale situazione di emergenza, o comunque di pericolo grave ed immediato, deve:
- segnalare l'emergenza contattando gli addetti presenti o il superiore gerarchico comunicando:
- il proprio nome,
- il luogo esatto dove si sta verificando la situazione di emergenza,
- il tipo di emergenza,
- le eventuali conseguenze già riscontrate,
- se l'emergenza coinvolge in modo diretto il personale (es. persone ferite gravi) contattare 115 e/o 118.

PROCEDURA DI EVACUAZIONE DEI LOCALI IN CASO DI EMERGENZA

In caso di emergenza il personale dovrà:
ATTIVARE IL SEGNALE DI EVACUAZIONE

NEL CASO DI ORDINE DI EVACUAZIONE DEL COMPRENSORIO, IL PERSONALE DOVRA' :
- dirigersi immediatamente lungo i percorsi di esodo (evidenziati dalla cartellonistica) verso le uscite di sicurezza, mantenendo la calma,
- durante l'esodo verificare che nessuno sia rimasto bloccato all'interno del locale ove stazionava, in quelli in cui transitava e nei locali non presidiati nelle vicinanze,
- seguire le informazioni eventualmente fornite dai componenti della squadra di emergenza,
- recarsi al punto di raccolta indicato sulla planimetria.

E' VIETATO IN OGNI CASO PRENDERE INIZIATIVE CHE POTREBBERO COMPROMETTERE LA PROPRIA ED ALTRUI INCOLUMITA'

INDICAZIONI PER IL PERSONALE INCARICATO
- mantenere la calma
- non intervenire da soli senza aiuti esterni, salvo casi in cui l'emergenza sia di ridotta portata, circoscritta o facilmente circoscrivibile,
- qualora la situazione d'emergenza si estenda, dare il segnale di evacuazione,
- contattare il Pubblico Soccorso,
- abbandonare l'area attraverso l'uscita più vicina non interessata dall'evento senza perdere tempo a raccogliere gli effetti personali
- assistere il personale presente, allontanarlo dall'area utilizzando il percorso più breve (prestando particolare attenzione ai disabili eventualmente presenti),
- prima di abbandonare l'area verificare per quanto possibile che nessuno sia rimasto bloccato all'interno.

Bibliografia e Sitografia

- Acquaro G., (2019), *La sicurezza ferroviaria*, CIFI, Roma;
- ALSTOM, (2011), *Automotrice CTR/EMU "Minuetto" – manuali per il personale di bordo addotto alla condotta*, Documento interno volume PBC – 010, Torino;
- Bababeik M., (2019), *Developing a train timetable according to track maintenance plans: a stochastic optimization of buffer time schedules*, Transportation Research Procedia, Vol. 37 pp. 27-34;
- Banks, J., (1998), *Handbook on Simulation. Principles, Methodology, Advances, Applications and Practice*. Wiley, New York.;
- Barlow R., Hunter L. C., (1960, 8), *Optimum Preventive Maintenance Policies*, Operations Research pp. 90 – 100;
- Bosso F., (2016), *Gestione del magazzino di un provider logistic: modello e simulazione in linguaggio Arena*, Tesi di Laurea, Università di Bologna, Bologna;
- Cantini S., Cervello S., Gallo R., (2016), *A modern approach to wheelset maintenance plan optimisation*, LRS-Techno Series, Lovere;
- Cerquarelli V., Giovine V., Viglietti A., (2019, 6), *L'evoluzione tecnologica ed organizzativa della circolazione ferroviaria in Italia*, Ingegneria Ferroviaria 463 – 491, CIFI;
- Ciuffini F., (2014, 1), *La qualità trasportistica dell'orario ferroviario*, Ingegneria Ferroviaria 525 - 540, CIFI;
- Corfiati M., Dalla Chiara B., Galfrè M., (2011, 9), *Evolution lines in the maintenance of rolling stock*, Ingegneria Ferroviaria 751 – 772, CIFI;
- Coviello N., (2018, 4), *Valutazioni di capacità basate sull'orario: analisi di una ferrovia suburbana a singolo binario*, Ingegneria Ferroviaria 287 – 317, CIFI;
- Dalla Chiara B., (2012), *Railway Engineering,* CLUT, Torino;
- Di Majo F., (1979), *Costruzioni di materiale ferroviario*, Levrotto e Bella, Torino;
- Ferrovie dello Stato, (2005), *Quinto rapporto costi esterni del trasporto*, Roma;
- Fiche UIC 811, Normativa Tecnica;
- Franceschini L., Garofalo A., Marini R. (da Cesari F., Rizzo V., Lucchetti S. (I^A ed.)), (2019), *Elementi generali dell'esercizio ferroviario*, CIFI, Roma;
- Furlanetto L., Garetti M., Macchi M., (2006), *Principi generali di gestione della manutenzione*, FrancoAngeli, Milano;
- Garetti F., (2012), *Modelli di ottimizzazione dei costi di manutenzione*, Tesi di Laurea, Politecnico di Milano, Milano;
- Genovesi P., Ronzino C.D., (2003, 11), *Un nuovo supporto alla normativa di esercizio*, Ingegneria Ferroviaria pp. 979 – 986, CIFI;
- Giannone P., (2010), *Manutenzione e sicurezza nell'esercizio ferroviario*, Tesi di Laurea, Politecnico di Torino, Torino;
- Gioletta S., (2018), *Manutenzione preventiva su carri merci feroviari: nuovo approccio all'ottimizzazione del processo*, Tesi di Laurea, Politecnico di Milano, Milano;

- Giovine V., (2007, 12), *Il "performance regime" – il sistema di valorizzazione delle prestazioni ferroviarie*, Ingegneria Ferroviaria pp. 1031 – 1039, CIFI;
- Gruppo Torinese Trasporti, (2018), *Fascicolo di Linea n° 1 e n°3*, Documento interno, Torino;
- Gruppo Torinese Trasporti, (2016), *Programmazione della manutenzione di 1° livello - TTR Ale501-Le220-Ale502,* Documento interno, Torino,
- Gruppo Torinese Trasporti, (2010), *Procedura operativa IT-001-GEN. Controllo sale montate*, Documento Interno, Torino
- Gruppo Torinese Trasporti, (2018), *Orario grafico linea Chieri – Rivarolo – Pont*, Documento Interno, Torino;
- Jovanovic S., Bozovic D., (2015), *Optimal structure and two case study implementations of railway maintenance management system*, Journal of management in engineering, Vol. 31
- Kelton D., Sadowski R.P., Sadowski D.A., *Simulation with Arena*, McGraw Hill, USA;
- Mayer L., (2005), *Impianti ferroviari*, CIFI, Roma;
- Mishalani R.G., Gong L., (2009), *Optimal infrastructure condition sampling over space and time for maintenance decision-making under uncertainly*, Transportation Research Part B, Vol.43 pp. 311-324;
- Orlandi A., (1990), *Meccanica dei trasporti*, Pitagora, Bologna;
- Pellandini G., (2003, 7/8), *Orario cadenzato integrato*, Ingegneria ferroviaria pp. 661 – 680, CIFI;
- Rete Ferroviaria Italiana, (2019), *Fascicolo di Linea n° 4*, Documento interno, Archivio web: https://donet.rfi.it/RFIPlatform/showDoc.do?docTypeHidden=FCL%2FFL%2FFO&fclNormEs=TO (consultato il 12/10/2019), Torino;
- Rete Ferroviaria Italiana, (2019), *Prefazione generale all'orario di servizio*, Documento interno, Archivio web: http://site.rfi.it/quadroriferimento/istruzioni2.htm (consultato il 26/10/2019), Roma;
- Rete Ferroviaria Italiana, (2019), *Regolamento sui segnali*, Documento interno, Archivio web: http://site.rfi.it/quadroriferimento/istruzioni2.htm (consultato il 26/10/2019), Roma;
- Rete Ferroviaria Italiana, (2009), *Regolamento per la circolazione dei treni*, Documento interno, Archivio web: http://site.rfi.it/quadroriferimento/istruzioni2.htm (consultato il 26/10/2019), Roma;
- Ricci S., (2013), *Ingegneria dei sistemi ferroviari. Tecnologie, metodi ed applicazioni*, Egaf, Forlì;
- Rockwell Automation Inc, (2019), *Arena user's guide*, Rockwell Automation Inc, USA;
- Sarah R., Nor H., (2012), *Review on scheduling techiniques of preventive maintenance activities railway*, 4th conference on computational modelling and simulation, pp. 310-315;
- SegnaliFS, *https://segnalifs.it/*. Sito web tecnico dedicato alla tecnica ferroviaria. Disponibile presso il link (consultato il 02/12/2019): https://www.segnalifs.it/sfi/it/sa/2016_segnali.htm;
- Tajani F., (2017), *Le Ferrovie*, Settegiorni Editore, Pistoia;

- Tertan V., (2017), *Preventive Railway Maintenance with censured failure data*, Tesi di Laurea, Università di Padova, Padova;
- Toneatto F.V., (2019), *Calcolo dell'usura di ruote ferroviarie: simulazione mediante codice multibody*, Tesi di Laurea, Politecnico di Torino, Torino;
- Ugenti A., (2017), *Modelli di simulazione per la gestione di uno scalo portuale*, Relazione di tirocinio, Università degli studi Roma Tre, Roma;
- UNI 9910:1991, *Terminologia sulla fidatezza e sulla qualità del* servizio, Normativa tecnica;
- UNI 10147:2003, *Manutenzione. Criteri di progettazione della manutenzione*, Normativa tecnica;
- Vicuna G., (1993), *Organizzazione e tecnica ferroviaria*, CIFI, Roma;
- WIKIRAIL, *https://wikirail.it/*. Enciclopedia libera online: CIFI. Disponibile presso il link (consultato il 24/10/2019): https://wikirail.it/glossario/grado-di-frenatura/;
- Yasmina H., Lionel A., (2008), *Simulation based optimization of a train maintenance facility*, Journal of intelligent manufacturing, Vol. 19 pp. 293-300
- Zhenliang F., (2012), *Review of High-Speed train maintenance*, Conference of quality, reliability, risk, maintenance and safety engineering, pp. 419-422

Ringraziamenti

Grazie al mio Professore, l'Ing. Bruno Dalla Chiara, per la fiducia in me riposta e per i preziosi spunti di riflessione durante la realizzazione di questa Tesi. Sicuramente rimarrà un punto di riferimento nella mia futura carriera.

Grazie alla Divisione Ferrovie e Metropolitana del Gruppo Torinese Trasporti per avermi ospitato nella loro azienda; in particolar modo all'Ing. Gian Piero Fantini per la calorosa accoglienza e continua attenzione e all'Ing. Piero La Scala per la disponibilità ed il suo costante supporto.

Grazie all'Ing. Claudia Caballini, correlatrice della Tesi, per il tempo che mi ha dedicato e per avermi accompagnato con attenzione e competenza durante tutto il lavoro.

Grazie a tutte le persone che hanno fatto parte della mia strada a Torino, in particolar modo ad Alice, Anna, Claudia, Davide, Emanuele (Lele), Emanuele, Evelyn, Federico, Francesco (Franky), Giulia, Guido, Luca, Matteo, Sofia, Tommaso e Valeria. Senza la vostra presenza non sarei riuscito ad arrivare fino qui.

Grazie ai miei amici di Genova: Cinzia, Claudia, Elisa, Francesca, Ilaria, Luigi e Martina. Con loro ho condiviso molti anni e anche a distanza sono stati sempre presenti nella mia vita.

Grazie a Rosario, in cui nutro grande fiducia e pur avendo abbandonato casa da diversi anni riceve sempre le mie chiamate con la richiesta di consigli.

Grazie ai miei compagni di corso, in particolare a Alessandro, Giuseppe e Michela con i quali ho condiviso il percorso al Politecnico e abbiamo superato insieme le difficoltà di questi anni.

Infine, la mia gratitudine va alla mia famiglia, mamma Daniela, papà Enrico, il fratello Marco, nonna Wanda e nonno Saido per la stima che nutrono in me e senza i quali non avrei mai potuto raggiungere questo traguardo.

A tutti loro dedico i miei successi.

Torino, 25/03/2020 *Matteo*