



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI TRIESTE

**XXIII CICLO DELLA
SCUOLA DI DOTTORATO DI RICERCA IN
INGEGNERIA CIVILE ED AMBIENTALE**

UN NUOVO APPROCCIO PER LA CALIBRAZIONE DELL'EQUAZIONE GENERALE DEL MOTO NELLA MODELLAZIONE STOCASTICA DELLA CIRCOLAZIONE FERROVIARIA

Settore scientifico-disciplinare ICAR/05

**DOTTORANDO
STEFANO de FABRIS**

**COORDINATORE DEL CORSO DI
DOTTORATO
PROF. ING. AURELIO
MARCHIONNA
UNIVERSITÀ di TRIESTE**

**RELATORE E SUPERVISORE
PROF. ING. GIOVANNI LONGO
UNIVERSITÀ di TRIESTE**

ANNO ACCADEMICO 2009/2010

Indice

Sommario	6
1 Introduzione	7
1.1 Calibrazione dell'equazione generale del moto	8
1.2 Proposta di un nuovo modello per il supporto alla costruzione dell'orario	9
1.3 Sviluppo di una metodologia per l'analisi della circolazione nelle grandi stazioni di testa.....	9
2 Equazioni del moto.....	10
2.1 Calcolo del tempo di percorrenza: principi generali.....	10
2.2 Modelli massa punto e massa distribuita.....	16
2.3 Parametri di prestazione.....	17
2.4 Utilizzo pratico.....	17
3 Analisi della circolazione:	19
3.1 OpenTimeTable	19
3.2 Analisi statistica delle occupazioni dell'infrastruttura.....	20
3.3 Modellazione dei ritardi e propagazione del ritardo in stazione	20
3.4 Ricerche precedenti all'Università degli studi di Trieste.....	21
3.5 Limiti dell'analisi macroscopica della marcia dei treni	22
3.6 Limiti dei modelli legati alla variabilità dei piazzamenti in stazione	23
4 Costruzione orario:.....	24
4.1 Definizioni.....	24
4.2 Specifica tecnica.....	28
4.3 Metodo dei gradini d'occupazione	30

4.4	Limiti dei tempi deterministici	30
5	Proposta di un metodo per la stima dei parametri di prestazione...	32
5.1	Dati di partenza.....	32
5.2	Prime considerazioni qualitative sui dati.....	33
5.3	Modello dell'infrastruttura.....	34
5.4	Software	37
5.5	Estrapolazione dell'aspetto dei segnali.....	40
5.6	Stimatore per la verifica dei parametri di prestazione.....	41
5.7	Calibrazione dei parametri	42
5.8	Fattori di prestazione e fasi del moto	44
5.9	Performance e criticità	45
6	Caso di studio	47
6.1	Accelerazione	48
6.2	Regime.....	53
6.3	Coasting	55
6.4	Frenatura	56
6.5	Altre considerazioni.....	58
7	Tempi di occupazione stocastici come supporto alla pianificazione dell'orario	59
7.1	Punti di partenza.....	59
7.2	Occupazioni stocastiche.....	61
7.3	Probabilità di conflitti	63
8	Analisi dei piazzamenti in una stazione di testa	64
8.1	Funzionamento di una stazione di testa.....	64
8.2	L'apparato di controllo della stazione di Roma Termini.....	64
8.3	Analisi generale.....	66
8.4	Analisi dettagliata	70
8.5	Limiti dei modelli di simulazione nelle stazioni di testa	80

9	Conclusioni e sviluppi futuri.....	81
9.1	Calibrazione delle equazioni del moto	81
9.2	Modelli per la simulazione della variabilità dei piazzamenti nelle stazioni.....	82
9.3	Futuri sviluppi.....	82
	Bibliografia.....	85

Sommario

La domanda di trasporto ferroviario è cresciuta considerevolmente nelle aree metropolitane e per il futuro si prevede un'ulteriore crescita di domanda. Un'alternativa alla costruzione di nuove infrastrutture ferroviarie è rappresentata dal miglioramento nella gestione delle linee esistenti.

Negli ultimi anni sono stati proposti numerose metodologie di analisi della circolazione ferroviaria; queste hanno lo scopo di analizzare la circolazione al fine di rilevare le criticità dell'orario e i colli di bottiglia dell'infrastruttura.

In questa ricerca sono presentate nuove metodologie di analisi dei dati di circolazione dei treni. In una prima parte, utilizzando il diagramma velocità - tempo di un treno, viene presentata una metodologia per ricavarne dei parametri di prestazione in modo tale da modellare il comportamento di guida del macchinista. Tali parametri influiscono sulle equazioni del moto e ne permettono la calibrazione. Una volta ricavati tali parametri per un certo numero di corse, gli usi che se ne possono fare sono molteplici.

Un utilizzo proposto è quello di calcolare una distribuzione statistica di tempi di occupazione delle diverse sezioni di blocco di un'infrastruttura in modo tale da permettere, in fase di pianificazione d'orario, di calcolare a priori una probabilità di conflitto tra treni.

Nell'ultima parte la ricerca è focalizzata sulla ricerca delle dinamiche di funzionamento di una grande stazione. Si è notato infatti che esistono delle stazioni di grande rilevanza in cui i piazzamenti dei treni sui binari non seguono la pianificazione, ma vengono modificati con delle dinamiche probabilistiche. Tale analisi è stata condotta sulla più grande stazione d'Italia, Roma Termini, con dei risultati che hanno dimostrato l'esistenza dei fenomeni stocastici che provocano delle alterazioni spaziali al percorso pianificato dei treni.

1 Introduzione

La domanda di trasporto ferroviario è cresciuta considerevolmente nelle aree metropolitane e per il futuro si prevede un'ulteriore crescita di domanda. Per soddisfare tale domanda sarebbe necessario costruire nuove infrastrutture nelle stesse aree, peraltro densamente popolate. Cosa che risulta difficile se si considerano i relativi costi e la necessità di una pianificazione a lungo termine. Poiché gli enti pubblici finanziano una parte dei costi del trasporto pubblico, essi richiedono un servizio da offrire alla clientela di qualità sempre maggiore, con la conseguenza che gli operatori sono chiamati a garantire sempre più elevati di servizio a costi sostenibili sia per la clientela che per gli operatori stessi. Per raggiungere questo risultato è necessario che i gestori dell'infrastruttura utilizzino al massimo la capacità delle linee esistenti, anche mediante l'uso di nuove soluzioni tecnologiche, senza aumentarne significativamente i costi di manutenzione. Un utilizzo efficiente dell'infrastruttura è un requisito indispensabile per aumentare la produttività, poiché permette di far viaggiare un elevato numero di treni senza rilevanti investimenti nell'infrastruttura.

Come è noto, esiste una stretta relazione tra la capacità di una linea e la regolarità del servizio offerto: la ricerca di un adeguato equilibrio tra questi due valori in modo tale che soddisfino le richieste dell'utenza e, nel contempo, minimizzino gli investimenti è diventato il principale obiettivo dei gestori dell'infrastruttura.

Negli ultimi anni sono state proposte numerose soluzioni per supportare la pianificazione dell'orario, modellando con precisione l'occupazione delle linee da parte dei treni ed eventualmente di simulare dettagliatamente il traffico ferroviario. Contemporaneamente sono stati sviluppati anche modelli teorici con lo scopo di creare automaticamente degli orari ottimizzati basati su algoritmi di ricerca operativa.

Tuttavia l'analisi e lo studio sul traffico ferroviario presenta ancora delle limitazioni, in particolare sui tipi di dati che i gestori dell'infrastruttura e gli operatori ferroviari registrano a scopo di rendicontazione. Spesso le analisi su questi dati vengono effettuate in maniera approssimativa, basandosi spesso sull'esperienza degli operatori, senza metodi analitici e precisi per la determinazione delle criticità.

La creazione di un orario infatti prevede l'introduzione anche di tempi di riserva, introdotti allo scopo di compensare le piccole variazioni che inevitabilmente si verificano durante la marcia dei treni. Attualmente la determinazione di questi tempi di riserva si basa su metodi empirici; negli ultimi anni, nuovi studi hanno portato a un'iniziale svolta nella determinazione dei margini in modo più sistematico e quantitativo.

Metodi di analisi meno recenti prevedono il controllo dei ritardi di gruppi di treni in determinati punti dell'infrastruttura per capire le prestazioni di un orario. Questo tipo di analisi può essere effettuato soltanto una volta che un orario ferroviario è entrato in esercizio. Tuttavia, alcuni modelli permettono di utilizzare i risultati dell'analisi di un orario già in esercizio per ricavare indicazioni utili per la costruzione degli orari futuri. Questi metodi di analisi e validazione sono molto lenti e richiedono una grande mole di lavoro da parte degli operatori.

L'utilizzo di dati diversi da quelli usati per la rendicontazione permette di entrare maggiormente nel dettaglio delle dinamiche dei treni svincolandosi dai problemi che affliggono molti metodi basati sull'analisi macroscopica dei dati di circolazione. I ritardi causati dalla presenza di più treni lungo la stessa infrastruttura ferroviaria che interagiscono tra loro sono molto difficili da rilevare e quantificare disponendo di dati rilevati con un sistema non continuo.

Al momento la letteratura che utilizza dati di questo tipo è molto scarsa e presenta dei problemi di complessità dei modelli proposti, rendendola di difficile applicazione pratica per problemi di larga scala.

1.1 Calibrazione dell'equazione generale del moto

Tutti i metodi attualmente utilizzati per costruire un orario partono da una base comune: il calcolatore di tempi di percorrenza. I metodi per calcolare il tempo di percorrenza di un treno su una linea ferroviaria sono ormai datati, tanto che possono essere considerati ormai una realtà consolidata. Tuttavia la loro applicazione pratica presenta un problema: questi metodi sono ricavati partendo da misure effettuate in condizioni di prova, potenzialmente diverse da quelle presenti durante l'esercizio ferroviario. Gli scostamenti tra misure reali ed equazioni teoriche possono

essere misurati utilizzando la metodologia esposta nel capitolo 5. In questo modo è possibile, dopo l'effettuazione di una campagna di misura, riprodurre un comportamento maggiormente realistico dei treni.

1.2 Proposta di un nuovo modello per il supporto alla costruzione dell'orario

Il calcolatore di tempi di percorrenza calibrato riproduce fedelmente il comportamento reale dei treni. Questo apre nuovi scenari nel campo della pianificazione dell'orario, in quanto non devono essere introdotti dei margini temporali allo scopo di compensare le differenze tra il comportamento teorico ed il comportamento reale dei treni. Il metodo esposto nel capitolo 7 prevede di utilizzare i dati sulle occupazioni delle sezioni di blocco dell'infrastruttura ricavate dalle equazioni calibrate del moto. Poiché la calibrazione elimina l'influsso dei ritardi secondari il comportamento di un treno è rappresentato con ottima approssimazione prima che la proposta di orario entri in esercizio. Pertanto, è possibile svincolarsi dal concetto di tempi di riserva e passare a quello di probabilità di conflitto. In questo modo si ritorna al problema iniziale: garantire una sufficiente qualità del servizio offerto a fronte del massimo sfruttamento della capacità dell'infrastruttura.

1.3 Sviluppo di una metodologia per l'analisi della circolazione nelle grandi stazioni di testa

Le maggior parte delle metodologie di analisi della circolazione ferroviaria si focalizzano sulle variazioni temporali della marcia dei treni. Sono tuttavia presenti anche variazioni di tipo spaziale durante la marcia dei convogli: la maggiore di queste variabilità è rappresentata dalla variazione dei piazzamenti dei treni nelle stazioni rispetto al loro binario pianificato. In riferimento al caso di studio della stazione di Roma Termini si propone uno strumento di analisi dei dati relativi ai piazzamenti dei treni in stazione. Il medesimo strumento è utilizzato anche per studiare alcuni fenomeni che caratterizzano il funzionamento della stazione.

2 Equazioni del moto

2.1 Calcolo del tempo di percorrenza: principi generali

Quando si pianifica un orario, è necessario stimare i tempi di percorrenza per diverse composizioni di treni che usano l'infrastruttura. Sebbene avvengano di rado cambiamenti significativi, quali la costruzione di una nuova linea, è normale che periodicamente si verifichino piccole variazioni nelle caratteristiche funzionali dell'infrastruttura stessa; si pensi, ad esempio, all'introduzione di un limite di velocità temporaneo in corrispondenza di un cantiere.

Tutti gli studi sulla capacità sono basati sui tempi di blocco delle sezioni critiche di un'infrastruttura. Normalmente questi tempi non sono presenti su un orario, pertanto devono essere calcolati. Un'interpolazione lineare derivata dai tempi di partenza ed arrivo è sbagliata, in quanto non si andrebbe a tenere in considerazione delle modalità in cui un treno accelera e frena.

Ci sono alcune informazioni indispensabili per poter calcolare un tempo di percorrenza:

- Dettaglio del percorso con distanze, limiti di velocità, ascese, curve e tunnel;
- Caratteristiche dell'unità di trazione, con lo sforzo trazione e la resistenza;
- Caratteristiche del materiale rimorchiato le quali dipendono da massa, lunghezza, e resistenza;
- Caratteristiche del servizio svolto (stazioni in cui il treno effettua servizio, tempi di sosta stimati);
- Caratteristiche dell'impianto frenante e dei sistemi di sicurezza installati.

In passato i tempi di percorrenza venivano stimati utilizzando algoritmi grafici manuali o strumenti meccanici. Attualmente i tempi di percorrenza vengono calcolati utilizzando dei computer.

Di seguito vengono esposte alcune formule utilizzate per calcolare i tempi di percorrenza.

2.1.1 Sforzo di trazione

La locomotiva oppure i motori dell'automotrice generano una forza che serve per spingere il treno. Questa è chiamata sforzo di trazione ed è misurata in Newton [N].

Sebbene per ogni unità di trazione in commercio è stata ricavata sperimentalmente una curva di sforzo trazione in dipendenza dalla velocità (figura 1), questa non può essere utilizzata completamente a causa di alcuni fattori:

- Le ruote possono slittare se lo sforzo eccede l'aderenza massima tra ruota e rotaia
- Lo sforzo può essere limitato in caso di surriscaldamenti del sistema di trazione o abbassamenti di tensione della linea di contatto, nel caso di trazione elettrica.

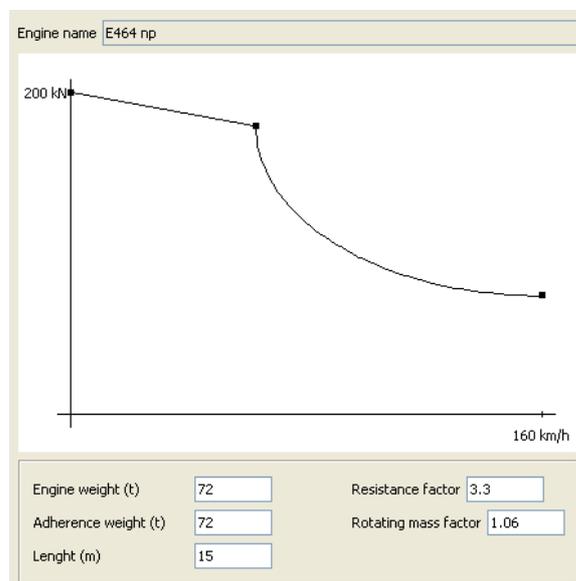


Figura 1: diagramma sforzo di trazione della locomotiva E464

Nel primo caso l'aderenza ruota-rotaia può essere calcolata con delle formule che dipendono dalla velocità. Il metodo storicamente più utilizzato per calcolare questo limite di aderenza è la formula di Curtius e Kniffel del 1950 (formula 1):

$$\mu(v) = \frac{7,5}{3,6v + 44} + 0,161 \quad (1)$$

Dove v è la velocità in km/h.

2.1.2 Resistenze al moto dei rotabili

Le resistenze per attrito possono essere divise in due categorie:

- Resistenze aerodinamiche: dipendono dal quadrato della velocità;
- Resistenze per attrito: sono le resistenze dovute principalmente all'attrito ruota-rotaia.

In pratica le resistenze sono genericamente descritte con equazioni di secondo grado dipendenti dalla velocità, del tipo:

$$F_r(v) = r_0 + r_1v + r_2v^2 \quad (2)$$

Sebbene esistano formule specifiche per treni con configurazione speciale, ad esempio il francese TGV, nella maggior parte dei casi si usano formule euristiche ricavate dalle caratteristiche generali dei treni.

In letteratura molti autori usano separare le resistenze per l'unità di trazione e per le eventuali carrozze rimorchiate. In tutte le formule lo sforzo calcolato è espresso in kiloNewton (kN).

Nel caso dell'unità di trazione la formula più usata è quella di Strahl:

$$F(v) = \frac{g \cdot (3,3 \cdot m_w + 0,03v^2)}{1000} \quad (3)$$

Dove v è la velocità del veicolo in km/h.

Nel caso del materiale rimorchiato si procede con due formule diverse, a seconda del caso in cui queste siano di tipo passeggeri o merci.

Nel caso di carrozze passeggeri si usa la formula di Sauthoff (1932):

$$F(v) = 1000m_w \cdot g \cdot (1,9 + c_b + v) + 0,0471 \cdot (n_w + 2,7) \cdot A_f \cdot v^2 \quad (4)$$

In questa formula troviamo alcuni parametri:

- v è la velocità del veicolo, in km/h,
- m_w è la massa del veicolo in tonnellate,
- c_b è un fattore che varia sulla base del numero di assi del veicolo stesso. Nel caso italiano, in cui tutte le carrozze passeggeri

attualmente in uso hanno quattro assi, pertanto viene utilizzato un valore di 0,0025.

- n_w è il numero di carrozze
- A_f è la superficie frontale equivalente del veicolo, che determina la resistenza aerodinamica. Questo valore, in accordo con la letteratura, viene considerato uguale a $1,45\text{m}^2$.

Nel caso di carri merci la formula usata è invece quella di Strahl (1913):

$$F(v) = 1000 \cdot m_w \cdot g \cdot (c_a + (0,007 + c_m) \cdot v^2 / 100) \quad (5)$$

I parametri utilizzati sono:

- v è la velocità del veicolo, in km/h,
- m_w è la massa del veicolo in tonnellate,
- c_a è il coefficiente d'attrito ruota rotaia, preso uguale a 1,4
- c_m è il coefficiente di attrito con l'aria, convenzionalmente uguale a 0,05.

2.1.2 Resistenze della linea

Le resistenze al moto causate dalla linea dipendono da tre fattori:

- il grado di ascesa,
- il raggio delle curve,
- la presenza di gallerie o altre strutture lungo la linea che possono influenzare il comportamento aerodinamico del treno.

Nel caso dell'ascesa il calcolo è molto semplice in quanto lo sforzo dipende dalla pendenza della linea:

$$F = 1000 \cdot m \cdot g \cdot \sin \alpha \quad (6)$$

Dove F è la resistenza espressa in kN , m è la massa del treno in tonnellate e α è la pendenza della linea in gradi. Poiché solitamente la pendenza della linea è espressa in gradi per mille (‰) e la funzione $\tan(x) \cong x$ per x vicino allo zero, la formula diventa:

$$F = 1000 \cdot m \cdot g \cdot n \quad (7)$$

Dove n è l'ascesa della linea in punti per mille.

E' necessario notare che spesso non è possibile conoscere con precisione il gradiente della linea. Nel caso dei Fascicoli Linea pubblicati da Rete

Ferroviana Italiana il dato relativo all'ascesa viene approssimato per tratte di cui viene fornita una pendenza media.

Per la resistenza in curva la formula convenzionalmente utilizzata è:

$$F = g \cdot m \cdot 700000 / r \quad (8)$$

Con r il raggio della curva espresso in metri.

Da osservare che per una curva di 700 metri di raggio la resistenza corrisponde ad un grado di ascesa dell'1‰. Pertanto si è preferito ignorare la resistenza in curva per due motivi:

- spesso non è noto il raggio delle curve di una linea
- l'eventuale errore commesso è di lieve entità

Per questi motivi si è preferito semplificare il calcolo e l'inserimento dei dati approssimando le curve con un grado di ascesa di un punto per mille di ascesa costante.

2.1.3 Combinazione delle resistenze e dello sforzo trazione

Le diverse resistenze al moto descritte nei paragrafi precedenti devono essere sommate tra loro. La differenza tra la resistenza complessiva del treno e lo sforzo trazione determina l'accelerazione del treno.

In questo punto è introdotto il fattore di masse rotanti. Questo è un numero che viene usato per compensare le masse rotanti all'interno degli organi di trazione e delle ruote, le quali si comportano come una "massa" aggiuntiva, non trascurabile in fase di accelerazione.

In questo caso è importante specificare il valore corretto per la locomotiva, tanto che ne è previsto l'inserimento manuale (figura 1). Per le carrozze ed i carri merci viene utilizzato convenzionalmente un valore pari a 1,06.

Per calcolare il fattore di masse rotanti dell'intero treno si usa la formula

$$f_p = (f_{pT} \cdot m_t + f_{pW} \cdot m_w) / (m_T + m_W) \quad (9)$$

Dove f_p è il fattore di masse rotanti del treno intero, f_{pT} è il fattore di masse rotanti della locomotiva, f_{pW} è il fattore di masse rotanti delle carrozze, m_T è la massa della locomotiva e m_W è la massa dei vagoni.

Per calcolare l'accelerazione si risolve la seguente equazione differenziale:

$$F_{Tr}(v) - F_R(v) = f_p \cdot m \cdot dv/dt \quad (10)$$

Dove m è la massa (in tonnellate), v è la velocità (in m/s) e t è il tempo (in secondi).

I metodi per la soluzione di questa equazione verranno spiegati in seguito.

Il calcolo del tempo di percorrenza si compone di tre lavori principali:

- Interpretazione di tutti i dati relativi al treno e all'infrastruttura
- Dividere il percorso del treno in pezzi con le stesse caratteristiche
- Risolvere l'equazione differenziale (10) per le sezioni di linea dove il treno non frena. Anche se alcuni calcolatori di tempo di percorrenza considerano presenti le resistenze al moto soltanto in accelerazione, talvolta ciò comporta una semplificazione eccessiva. La spiegazione è motivata da casi documentati dove il treno, una volta raggiunta la velocità massima ammessa dalla linea, non riesce a mantenere la velocità a causa di un incremento del gradiente di ascesa.

2.1.4 Frenatura

In letteratura è possibile trovare diverse formule per il calcolo della frenatura. La più autorevole di queste, ovvero la frenatura UIC, modella la frenatura come un moto costantemente decelerato, la cui entità, espressa in m/s^2 , è calcolata mediante la formula:

$$a = -(c_1 + c_2 \cdot BWP) \quad (11)$$

Dove c_1 è una costante uguale a 0,069, c_2 è un'altra costante uguale a 0,006 e BWP è il peso frenato percentuale del treno. Il peso frenato percentuale è determinato empiricamente al momento dell'omologazione del materiale rotabile; questo valore viene usato per il calcolo della distanza di frenatura da parte dei sistemi di sicurezza utilizzati a livello nazionale ed europeo. Per questo motivo il valore di questo parametro è sempre noto per tutti i treni. Durante la fase di frenatura vengono ignorate tutte le resistenze al moto, a meno della sola resistenza al gradiente.

2.2 Modelli massa punto e massa distribuita

Come detto nell'equazione (10), la funzione tra il tempo e la velocità durante l'accelerazione è espresso da un'equazione differenziale.

Sia lo sforzo trazione (F_{Tr}) che le resistenze al moto (F_R) sono funzioni della velocità. Dal momento che $v = ds/dt$, è possibile sviluppare l'equazione differenziale (10):

$$(F_{Tr}(v) - F_R(v))/v = m \cdot f_p \cdot \frac{dv}{dt} \cdot \frac{dt}{ds} = m \cdot f_p \cdot \frac{dv}{ds} \quad (12)$$

Dove la velocità v è espressa in m/s e la massa del treno m è espressa in kg. Lo sforzo trazione F_{Tr} e la resistenza F_R sono funzione della velocità.

Nella realtà i treni hanno una lunghezza non trascurabile. La formula (12) presenta dei problemi in corrispondenza dei punti dove c'è un cambio di gradiente di ascesa della linea. E' possibile considerare il treno come una striscia dove la massa è distribuita uniformemente lungo l'intera lunghezza del treno.

E' possibile pertanto calcolare la resistenza al gradiente estendendo la formula (12):

$$F_R = \sum_i m_i \cdot g \cdot n_i \quad (13)$$

con

$$m_i = m \cdot L_i / L \quad (14)$$

Dove n_i è il gradiente relativo all' i -esima parte del treno, L la lunghezza complessiva del treno, L_i la lunghezza del treno sottoposto al gradiente n_i ed m la massa del treno.

Esistono modelli più complessi, che prendono in considerazione il singolo elemento del treno (vagone, locomotiva) ciascuno con massa equidistribuita al suo interno.

2.3 Parametri di prestazione

Nei capitoli precedenti si è parlato delle modalità per calcolare le prestazioni teoriche dei treni. Tuttavia altri autori hanno notato in precedenza che esiste una variabilità nella marcia dei treni dovuta ad una serie di fenomeni. Ad esempio Steckel (1991) propone di usare distribuzioni casuali per tenere in considerazione di tre fenomeni:

- Massa del treno: la massa di un treno può essere diversa ogni giorno. Nel caso di un treno passeggeri questa varia in base al numero di viaggiatori trasportati, mentre nel caso di treni merci dipende dal numero di vagoni e dal loro riempimento. Suggerisce di modellare il parametro della massa con una distribuzione di Weibull i cui parametri sono ricavati sperimentalmente.
- Fattore di massa: le irregolarità degli assi causano resistenze addizionali. Queste resistenze addizionali sono considerate distribuite uniformemente tra un limite inferiore ed uno superiore.
- Peso dell'unità di trazione: se l'unità di trazione è di tipo diesel, il suo peso dipenderà anche dal quantitativo di carburante a bordo.

Per tenere in considerazione questi fenomeni, i simulatori ferroviari propongono l'uso di un parametro di prestazione, solitamente espresso in punti percentuali, che va ad influire sullo sforzo trazione, sulla velocità massima della linea e sulle prestazioni in frenata. Questo permette di compensare le prestazioni teoriche, supponendo che in condizioni di esercizio un treno non verrà sfruttato al massimo delle sue potenzialità. E' possibile inoltre far variare il parametro di prestazioni sulla base del ritardo accumulato dal treno.

2.4 Utilizzo pratico

Il calcolo del tempo di percorrenza mediante l'uso delle equazioni del moto è il fondamento di tutti i simulatori ferroviari e dei software per la costruzione dell'orario. Il vantaggio principale è quello di calcolare, in modo molto dettagliato, il tempo di percorrenza di un treno su una linea, senza necessariamente fare una prova pratica. Questo è di fondamentale importanza in fase di progettazione di una nuova infrastruttura, in modo tale da poter valutare a priori se questa può soddisfare determinati

requisiti. Ad esempio in fase di progettazione di una nuova linea ferroviaria su percorso in salita è possibile calcolare la locomotiva più adatta per far superare ad un treno merci di una determinata massa una certa rampa in salita alla velocità desiderata. In tal caso il progettista può decidere se modificare il tracciato della linea limitandone ad esempio la pendenza.

Gli svantaggi dell'uso delle equazioni del moto è quello del loro peso computazionale e dei dati necessari per il calcolo del tempo di percorrenza. Sebbene il peso computazionale sia ormai esiguo per i calcolatori moderni, la quantità di dati che l'utente deve essere fornita in ingresso resta notevole.

Un contesto nel quale le equazioni del moto sono di fondamentale importanza è quello dei simulatori ferroviari. La necessità di calcolare con precisione la posizione del treno sull'infrastruttura per ogni istante di tempo, dal quale derivano lo stato del segnalamento e i tempi di occupazione delle sezioni di blocco, è di fondamentale importanza per ricostruire le dinamiche della circolazione ferroviaria.

3 Analisi della circolazione:

Negli ultimi trent'anni numerosi autori hanno analizzato la circolazione ferroviaria. I dati di partenza utilizzati per le ricerche sono diversi e negli anni c'è stata un'evoluzione dei dati utilizzati e nei risultati delle ricerche effettuate. Il recente libro *Railway timetable and Traffic* (Hansen et al., 2008) raggruppa in maniera sistematica i risultati di queste ricerche.

3.1 OpenTimeTable

In letteratura è possibile trovare diverse pubblicazioni che discutono dell'analisi statistica dei dati di circolazione dei treni. Sebbene i dati di circolazione dei treni sono stati analizzati da numerosi autori a partire dal 1974, il software sviluppato da Ullius (Ullius, 2004) durante il suo dottorato ha il pregio di essere stato il primo software a sistematizzare le metodologie di analisi dei dati di circolazione ferroviaria. Nella sua tesi sono sistematizzati e resi disponibili per analisi sistematiche di grandi reti ferroviarie alcuni tipi di analisi dei dati. Ciò ha offerto la possibilità di trovare in maniera automatica le criticità del vecchio orario ferroviario svizzero (precedente al dicembre 2004) e di utilizzare questi dati di sintesi nel momento della redazione del nuovo orario ferroviario del 2004/2005. La semplicità di utilizzo ha fatto sì che il software sia ancora usato dalle Ferrovie Svizzere come strumento di analisi sia a breve che a lungo termine. L'uso del software ha portato a ottimi risultati in termini di stabilità dell'orario ferroviario svizzero del dicembre 2004.

Il software in seguito è stato utilizzato anche per ulteriori ricerche all'interno dell'ETH di Zurigo, in particolare per l'analisi dei dati ottenuti con il simulatore ferroviario OpenTrack nel corso degli studi teorici preliminari all'introduzione del progetto Pulse nel nodo ferroviario di Lucerna.

Il software utilizza i dati di circolazione dei treni (orario di arrivo e partenza dalle stazioni) acquisiti dalle Ferrovie Federali Svizzere. Questi dati vengono analizzati in modo tale da calcolare i valori di puntualità e ritardo medio aggregati per categorie di treni nei punti d'interesse della rete.

3.2 Analisi statistica delle occupazioni dell'infrastruttura

Un approccio diverso rispetto al lavoro di Ullius è stato fatto nelle pubblicazioni di Goverde (Goverde, 2005). Le sue pubblicazioni hanno potuto utilizzare dati più precisi di quelli di circolazione treni. Sono stati utilizzati i dati del sistema, in uso nelle ferrovie olandesi, che registra i tempi di occupazione delle sezioni di blocco e dei messaggi trasmessi ai treni dal sistema di segnalamento. Utilizzando questi dati molto precisi è stato possibile ricostruire le occupazioni reali delle sezioni di blocco dell'infrastruttura. Questo sistema ha reso possibile indagare sulle cause dell'interazione tra treni all'interno delle stazioni che causano un incremento del ritardo.

Sulla base dell'analisi di questi dati è stato proposto un modello matematico per calcolare la stabilità di un orario. Il modello si basa sul concetto che il traffico ferroviario deve scontrarsi con numerosi problemi di interdipendenze causate sia dal trasferimento di passeggeri da un treno all'altro sia dall'infrastruttura che viene condivisa da più treni. Il modello è basato su una rete di Petri che descrive le relazioni tra eventi ed il loro processo logico.

3.3 Modellazione dei ritardi e propagazione del ritardo in stazione

Un successivo sviluppo del lavoro di Grovede è costituito dal lavoro di Yuan (Yuan, 2006), che ha sviluppato una teoria che stima i ritardi secondari causati dai conflitti e dalle coincidenze in ritardo e studia il loro impatto sui ritardi in stazione. Per ottenere una stima reale utilizzando il modello di propagazione dei ritardi, è stato condotto un'analisi dettagliata utilizzando i dati di occupazione della stazione di una stazione olandese.

Sono state ricavate le distribuzioni teoriche valutandole con il metodo Kolmogorov-Smirnov (K-S) goodness-of-fit; queste distribuzioni sono state in seguito utilizzate come dato di ingresso nel modello di propagazione dei ritardi. Il modello proposto può essere applicato per massimizzare l'utilizzo della capacità della stazione dati dei livelli prestabiliti di affidabilità e puntualità dei treni.

Il metodo proposto non si applica soltanto ai ritardi dei treni, ma anche per la verifica della propagazione dei ritardi tra treni e la stima della capacità utilizzata nelle sezioni critiche dell'infrastruttura. Uno dei maggiori risultati ottenuti è stata la dimostrazione che per diminuire la probabilità di ritardi secondari è necessario evitare non soltanto i ritardi, ma anche gli anticipi.

La pubblicazione propone inoltre un nuovo metodo per migliorare la precisione dei parametri di una distribuzione. E' stato ad esempio scoperto che una distribuzione log-normale traslata con il parametro di traslazione uguale al minor tempo di arrivo può essere generalmente considerata la migliore tra le distribuzioni candidate sia per i tempi di arrivo del treno in stazione sia per i tempi di arrivo al segnale di protezione di una stazione.

La distribuzione Weibull può invece essere considerata la migliore distribuzione possibile per rappresentare i ritardi di arrivo non-negativi, i ritardi in partenza e i tempi di sosta dei treni in assenza di interferenza con altri treni.

3.4 Ricerche precedenti all'Università degli studi di Trieste

In passato, nel contesto delle attività di ricerca del Dipartimento di Ingegneria Civile ed Ambientale dell'università degli studi di Trieste, sono state condotte alcune ricerche sul tema della circolazione ferroviaria. Uno di questi, proposto da Stok, è basato su una famiglia di processi stocastici chiamati processi Browniani. Il movimento del treno è modellato con equazioni differenziali sulle quali è applicato il moto browniano, cosa che porta a delle equazioni differenziali stocastiche. Utilizzando metodi numerici, basati sulla generazione di numeri casuali, è possibile risolvere le equazioni differenziali stocastiche e ottenere il percorso del treno.

L'analisi dei fenomeni stocastici utilizza il metodo Monte Carlo in modo tale da calcolare la soluzione di equazioni differenziali stocastiche. Questo gruppo di tracce stocastiche può essere usato in due modi differenti: la stima probabilistica dei tempi di blocco e la stima del rischio di conflitto tra treni che viaggiano liberamente sulla linea (senza tenere in considerazione il segnalamento). Poiché il rischio di conflitto varia a seconda della densità di treni sulla linea, viene trovata la relazione tra la capacità utilizzata ed il rischio di conflitto.

Benché questo metodo porti ad una stima precisa dei tempi di riserva tra le tracce e la loro relazione con i ritardi secondari, esso pone dei problemi di applicabilità a causa della complessità dell'approccio utilizzato. Questo approccio infatti si basa su un modello semplificato dell'infrastruttura, non utilizza un orario e non è stato implementato un modello di segnalamento complesso. Pertanto non può essere utilizzato per problemi su un'area vasta.

Un approccio simulativo all'analisi della circolazione ferroviaria è stato avanzato da Medeossi il quale, mediante l'utilizzo di un microsimulatore, riproduce gran parte dei fenomeni reali che avvengono in un sistema ferroviario. Il simulatore viene tarato calibrando le equazioni del moto in modo tale che la distribuzione misurata di tempi di percorrenza tra le stazioni sia uguale a quella simulata in fase di calibrazione. Il ritardo iniziale dei treni, come anche il tempo di sosta nelle stazioni, viene stimato utilizzando metodologie consolidate. Questo metodo presenta numerosi vantaggi, tra i quali la valutazione puntuale di interventi sull'infrastruttura e/o sull'orario, la stima dell'impatto sulla stabilità dell'orario al variare di allungamenti e riserve. Tuttavia anche questo metodo presenta alcune limitazioni, tra le quali la mole di lavoro che l'operatore deve compiere per realizzare e valutare ogni singolo scenario, il tempo necessario per eseguire delle simulazioni stocastiche ed il metodo di calibrazione delle equazioni del moto, che è limitata al solo tempo di percorrenza.

3.5 Limiti dell'analisi macroscopica della marcia dei treni

Da quanto emerge dalle pubblicazioni recenti, i limiti di un'analisi macroscopica dei dati di circolazione è tanto più evidente quanto si cerca di condurre un'analisi dettagliata della circolazione.

Con il lavoro di Ullius è stato possibile rilevare le criticità della circolazione in modo molto dettagliato in modo da fornire indicazioni su una loro possibile soluzione. Tuttavia non è stato proposto alcun metodo per validare un orario.

Questi limiti emergono anche nei lavori di Stok e Conte, i quali partono da dati macroscopici per le loro considerazioni. Questi due lavori non possono essere applicati in fase di costruzione dell'orario o per la validazione di un orario.

Studi più dettagliati, quali quelli di Grovede e Yuan utilizzano dati di maggiore qualità e pertanto permettono di ottenere risultati migliori anche nel campo della validazione di un orario. I due studi sono stati condotti utilizzando i dati forniti dal gestore dell'infrastruttura olandese è stato utilizzato il software TNV-Pepare, il quale permette di analizzare i dati di occupazione di tutte le sezioni di blocco dell'infrastruttura e compiere analisi statistiche sugli stessi dati.

3.6 Limiti dei modelli legati alla variabilità dei piazzamenti in stazione

Tutti i modelli presentati fino a questo momento presentano un difetto: non viene preso in considerazione il fatto che un treno possa variare il suo piazzamento in una stazione rispetto a quello pianificato. Questo è dovuto al fatto che all'estero il cambio di piazzamento è un evento molto raro, tanto da poter essere ignorato nei modelli. In Italia l'esperienza degli operatori indica che il problema esiste e si verifica con modalità diverse a seconda delle singole realtà.

Il problema della variabilità del piazzamento è sentito soprattutto nelle grandi stazioni di testa, nei quali il tempo di sosta è più lungo rispetto alle stazioni di transito in quanto è necessario compiere le operazioni necessarie per invertire il senso di marcia del treno. La variazione di piazzamento in una stazione di testa significa alterare il luogo di occupazione di un determinato treno per un tempo non inferiore ai 10 minuti, come nel caso degli Eurostar nella stazione di Firenze Santa Maria Novella, ma nel caso più generale di circa 20 minuti.

Questa operazione provoca notevoli ripercussioni sulla circolazione, in quanto può comportare l'insorgere di conflitti di circolazione laddove non erano previsti in fase di pianificazione dell'orario.

4 Costruzione orario:

4.1 Definizioni

In questa sezione si definiranno alcuni concetti sulla capacità ferroviaria:

- **Capacità teorica:** è il numero massimo di treni che può percorrere una linea in condizioni ideali in un intervallo di tempo stabilito. Il caso ideale prevede che tutti i treni siano identici, distanziati in maniera uguale l'uno dall'altro, viaggianti alla minima distanza temporale ammissibile l'uno dall'altro. La capacità teorica è soltanto un limite superiore per la capacità in quanto nella realtà è impossibile esercire una linea in queste condizioni.
- **Capacità reale:** è il limite pratico del volume di traffico che può essere spostato su una linea con un ragionevole livello di affidabilità. Questa è la misura della capacità in quanto calcolata su ipotesi realistiche e dipende dal modo in cui è utilizzata l'infrastruttura (UIC 406R). Solitamente la capacità reale è tra il 60 ed il 75% della capacità teorica.
- **Capacità utilizzata:** è il volume di traffico pianificato su di una linea. Questa misura l'attuale occupazione dell'infrastruttura determinata dall'orario pianificato. Solitamente è inferiore alla capacità reale.
- **Capacità disponibile:** è la differenza tra la capacità reale e la capacità utilizzata e rappresenta il volume di traffico che può essere ancora gestito dall'infrastruttura.

Gli attributi di una ferrovia considerata come sistema di trasporto sono i seguenti:

- **Affidabilità:** è la capacità di un sistema (o sua componente) di eseguire la sua funzione per un determinato periodo di tempo sotto condizioni note. Nel caso della ferrovia l'affidabilità è definita come la quantità di treni che viaggia in orario. In letteratura si trovano diversi modi per misurare l'affidabilità: i più usati sono il ritardo medio e la puntualità. Nel lavoro di Medeossi è stato proposto un nuovo indicatore per quantificare il ritardo dei treni.
- **Robustezza:** indica quanto il sistema è influenzato dai disturbi. Se il sistema non è robusto un piccolo ritardo iniziale di un treno può propagarsi velocemente ad altri treni causando pesanti ritardi.
- **Stabilità:** un sistema stabile assorbe velocemente i ritardi.

- Ritardo: è definito come la differenza tra l'orario misurato e quello pianificato di un evento (ad esempio: il ritardo in partenza).
- Ritardo primario: è il ritardo non causato da altri treni in ritardo, ma solo dai disturbi. Viene anche chiamato ritardo iniziale.
- Ritardo secondario: è il ritardo causato ad un treno da parte di altri treni.
- Puntualità: è la percentuale di treni che arrivano in un punto dell'infrastruttura con un ritardo inferiore ad una soglia prestabilita. E' solitamente usato per misurare le prestazioni di un sistema ferroviario.

L'approccio moderno per la stima della capacità fa riferimento alla teoria dei tempi di blocco. Questa teoria richiede l'introduzione dei seguenti concetti:

- Sistema a blocco fisso: è il sistema di segnalamento convenzionale, dove la linea ferroviaria è divisa in sezioni di blocco fisse protette da segnali. Il segnale dà al macchinista le informazioni sulle successive sezioni di blocco. Tipicamente un segnale ha tre aspetti:
 - Rosso: il treno deve fermarsi in quanto la sezione di blocco protetta dal segnale è occupata
 - Giallo: il treno deve prepararsi alla fermata in corrispondenza del prossimo segnale
 - Verde: il treno può proseguire normalmente
- Sezione di blocco: è la lunghezza del binario tra due segnali di blocco
- Occupazione di blocco o tempo di blocco (blocking time): è il tempo durante il quale una sezione di blocco è occupata da un treno, o più precisamente l'intervallo di tempo nel quale la sezione è allocata per quel treno e bloccata per altri treni. L'occupazione inizia quando il treno entra nella distanza di visibilità del segnale all'inizio della sezione di blocco che precede quella protetta e finisce quando la coda del treno passa il punto di liberazione (figura 2). Il tempo di blocco è il minimo intervallo di tempo che può intercorrere tra due treni successivi. Il tempo di blocco non deve sovrapporsi in modo da evitare conflitti tra treni.

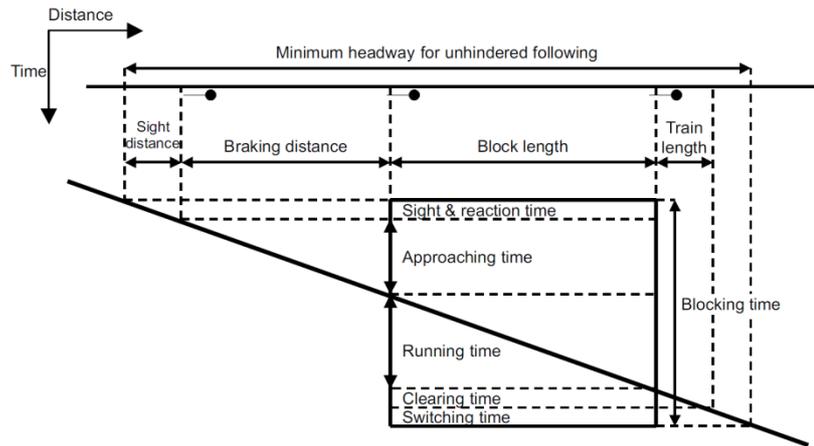


Figura 2: distanziamento minimo tra treni lungo una linea (Goverde, 2005)

- Distanza minima: è la distanza tra le teste di due treni consecutivi che si muovono insieme lungo lo stesso binario nella stessa direzione. La distanza minima è la distanza permessa dal sistema di segnalamento che separa due treni.
- Intertempo tecnico: è l'intervallo di tempo tra due treni, più precisamente definito come l'intervallo minimo di tempo tra le teste di due treni consecutivi che percorrono lo stesso binario nella stessa direzione.
- Gradini di occupazione: in riferimento al diagramma distanza tempo, è la sequenza di tempi di blocco di tutte le sezioni che il treno attraversa. Permette di determinare l'intertempo minimo della linea, vedi figura 3.

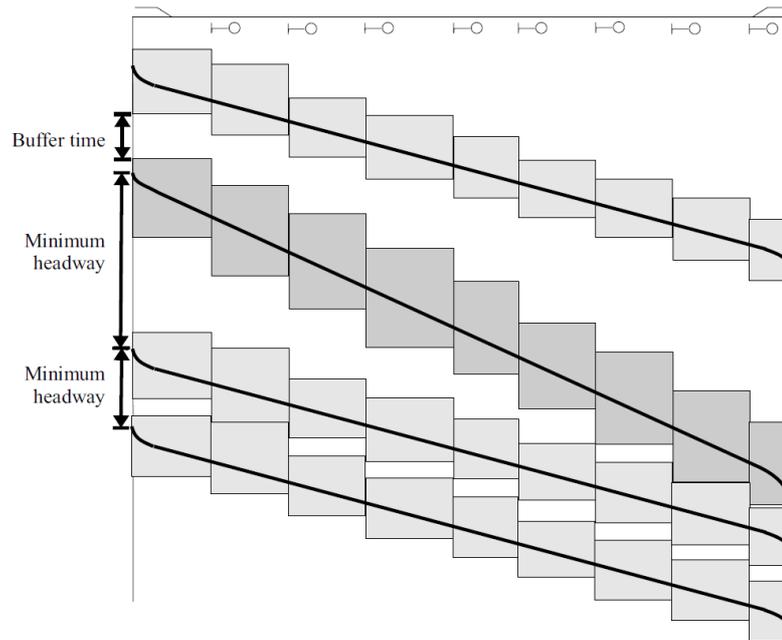


Figura 3: tempo di segnalamento e intertempo minimo di linea (Goverde, 2005)

- Tempo di segnalamento (signal headway): è il minimo intervallo di tempo tra due treni consecutivi ed è misurato nella sezione critica dove i due tempi di blocco si toccano tra loro.
- Intertempo minimo di linea (minimum headway): è il tempo minimo tra due treni considerando il tempo di blocco in tutte le sezioni della linea, laddove i tempi di blocco si toccano tra loro.
- Riserva: è definita come la differenza temporale tra l'intertempo di treni definito da orario e l'intertempo minimo.
- Allungamento: è la differenza tra il tempo di percorrenza pianificato e il tempo di percorrenza minimo. Una parte di esso è calcolato come compensazione di eventuali rallentamenti per lavori in linea, un'altra parte per permettere al treno di recuperare eventuali ritardi.
- Tempo di sosta: il tempo totale di sosta di un treno alla stazione, dall'istante in cui il treno si ferma completamente all'istante in cui il treno ricomincia a muoversi.
- Capacità dell'orario: è il massimo numero di treni che può essere pianificata considerando l'occupazione dei blocchi senza considerare le riserve.
- Occupazione dell'infrastruttura: dato un orario, è il risultato della compressione dell'orario, così come descritto nel fascicolo UIC 406R.

Questo è il tempo di occupazione misurato all'inizio della prima sezione di blocco, con riferimento ad una finestra temporale.

- Tempo consumato totale: dato un orario, è la somma dell'occupazione dell'infrastruttura, delle riserve e di altri allungamenti come definito nel fascicolo UIC 406R.
- Capacità utilizzata: dato un orario, è il rapporto tra il tempo consumato totale e la durata della finestra temporale scelta come riferimento.
- Capacità disponibile: dato un orario, è la differenza tra la capacità consumata e la finestra temporale scelta come riferimento. Può essere divisa in:
 - Capacità utilizzabile: la parte che può essere utilizzata per inserire ulteriori tracce che soddisfano le esigenze dei clienti.
 - Capacità persa: è il tempo rimanente che non può essere utilizzato per l'inserimento di ulteriori tracce.
- Segnalamento a blocco mobile: è un sistema di segnalamento che non ha sezioni di blocco fisse: il sistema calcola un'area attorno a ciascun treno dove nessun altro treno può entrare. La lunghezza delle sezioni di blocco è ridotta a zero e i gradini di occupazione diventano un canale temporale continuo.

4.2 Specifica tecnica

Il metodo della specifica tecnica è la metodologia maggiormente usata per redigere gli orari ferroviari. Questa metodologia è utilizzata in Italia da RFI per la stesura dell'orario. Essa è definita come somma dell'intertempo minimo e della riserva. Questo tempo viene calcolato a priori dalla Direzione Movimento di RFI, per ogni tratta e raggruppato per linee.

In particolare la normativa individua alcune caratteristiche delle specifiche tecniche, le quali sono caratterizzate dai seguenti parametri:

- Parametri standard; gli stessi vengono proposti per una applicazione estesa sulle linee della Rete e nei Nodi;
- Parametri "particolari", relativi a punti singolari delle linee e dei nodi, in coincidenza di significative stazioni di origine/termine corsa dei treni, di diramazione, di distanziamento dei treni.

Per entrambi i parametri, in funzione della tipologia dei regimi di circolazione presenti nella tratta, le Specifiche di Circolazione propongono in generale, alcuni parametri:

- Il distanziamento dei treni in linea e nelle stazioni di origine e termine corsa. Il valore di distanziamento in linea vale anche per le stazioni intermedie, se il treno è ricevuto sullo stesso binario del treno che lo ha preceduto; se il ricevimento avviene in altro binario potranno essere applicati i parametri previsti per le precedenza;
- Il distanziamento dei treni per itinerari incompatibili;
- Il distanziamento dei treni in caso di incroci e precedenza;
- I percorsi deviati a velocità superiore a 30 Km/h;
- I perditempi da assegnare ai treni con fermata nelle varie località di servizio.

Un esempio di come la specifica tecnica viene utilizzata è rappresentata in figura 4.

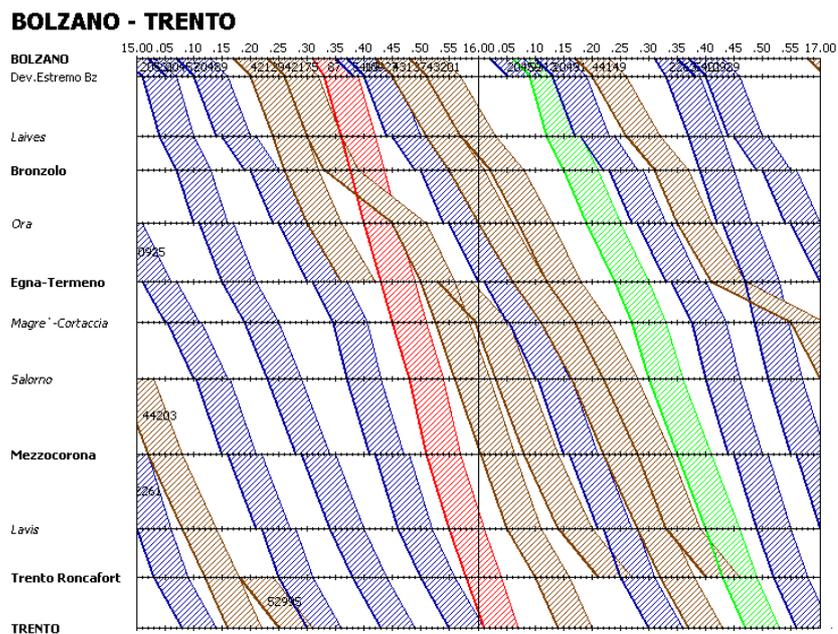


Figura 4: esempio di specifica tecnica: la linea del Brennero

La specifica tecnica è rappresentata graficamente come una fascia temporale che segue un treno. Questa metodologia si basa su di un grafo macroscopico dell'infrastruttura. I vantaggi di questo metodo sono essenzialmente la sua semplicità, in quanto il controllo grafico dell'operatore può essere sufficiente per discriminare eventuali conflitti. Esistono tuttavia degli applicativi per calcolatore, alcuni anche datati, che

permettono un controllo automatico delle specifiche tecniche. Tra questi vale la pena citare applicativi quali Viriato, Capres e Roman che sono attualmente utilizzati come strumenti per la pianificazione dell'orario dalla maggior parte degli enti preposti a livello europeo.

4.3 Metodo dei gradini d'occupazione

Il metodo dei gradini di occupazione è stato proposto per la prima volta da Schwanhäuber nel 1978. Questo metodo è stato in seguito ripreso da Hansen e Pacht quale base della costruzione dell'orario. Esso utilizza i gradini di occupazione calcolati in maniera deterministica utilizzando un modello microscopico di infrastruttura ferroviaria. Per ogni treno che deve essere inserito in orario viene calcolato il tempo di percorrenza, vengono aggiunti gli allungamenti e vengono calcolati i tempi di blocco. Questi diagrammi temporali vengono poi disegnati su un grafico tenendo in considerazione un ulteriore tempo di riserva tra le tracce (buffer time, figura 3).

Questo metodo, essendo basato su un modello microscopico dell'infrastruttura, presenta il vantaggio di tenere adeguatamente in considerazione il tipo di segnalamento e tutte le caratteristiche dell'infrastruttura.

4.4 Limiti dei tempi deterministici

Entrambi i metodi esposti nelle due sezioni precedenti presentano il medesimo problema: la mancanza di un metodo consolidato per stabilire l'entità di allungamenti e riserve. Il metodo della specifica tecnica semplifica molto il modello dell'infrastruttura: questo approccio comporta semplificazioni ed approssimazioni rendendo poco utile la ricerca di un metodo preciso per stimare le specifiche tecniche.

Il metodo dei gradini di occupazione invece si presta a considerazioni più rigorose dal punto di vista scientifico.

Nelle raccomandazioni dell'UIC non è possibile trovare alcuna indicazione per quanto riguarda le riserve; al contrario viene suggerito di utilizzare un

tempo di allungamento di circa il 5% del tempo di percorrenza minimo. In alcune pubblicazioni recenti (Hansen, 2008) è stato trattato in maniera qualitativa il problema dei conflitti definiti come sovrapposizione stocastica dei tempi di blocco dei treni (figura 5).

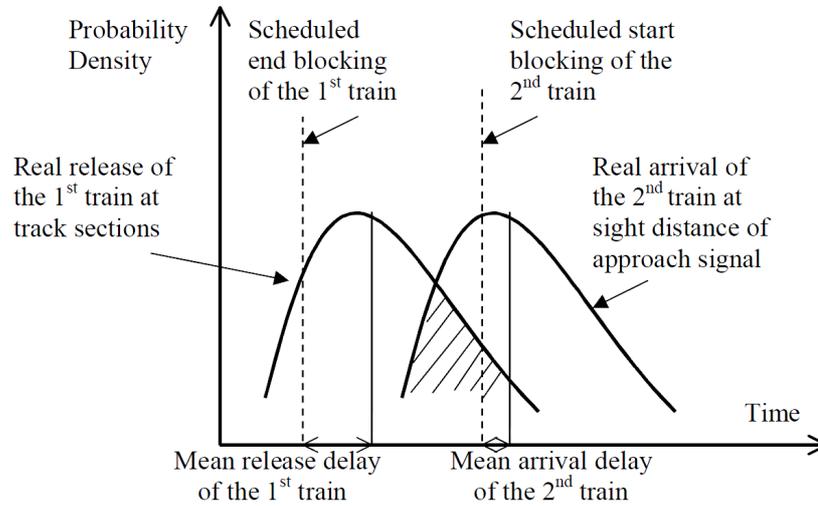


Figura 5: probabilità di conflitto tra due treni

Tuttavia anche tale approccio, seppur corretto dal punto di vista concettuale, non suggerisce una soluzione quantitativa al problema di determinare riserve ed allungamenti in funzione della probabilità di conflitto.

5 Proposta di un metodo per la stima dei parametri di prestazione

5.1 Dati di partenza

Per procedere a un'analisi accurata della circolazione è necessario utilizzare un tipo di dati adeguato all'analisi stessa. Poiché è necessario avere dati molto precisi sulla singola corsa di ciascun treno al fine di estrarre il modo in cui questo ha viaggiato, si è pensato di utilizzare un tipo di dato che viene già registrato da molti anni: il diagramma spazio/velocità.

Avendo a disposizione dei dati molto precisi sulla marcia di un treno, come ad esempio il diagramma velocità-tempo con un campionamento di 10 misure di velocità al secondo, è possibile effettuare delle diverse considerazioni sul modo esatto in cui viaggia un treno.

Dopo alcune prove effettuate con ricevitori GPS commerciali si è potuto constatare che i dati raccolti erano di discreta qualità, pertanto si è proceduto ad una campagna di misura utilizzando un GPS non differenziale ad elevata precisione. Il registratore GPS utilizzato è stato dotato di un'antenna esterna al fine di migliorare il segnale ricevuto; tuttavia i dati ottenuti sono stati filtrati per sopperire ad alcune carenze.

Un primo problema riguarda il rumore che accompagna la misura. Questo va a generare due differenti problematiche: il rumore durante la marcia ed il rumore a treno fermo. Nel primo caso si è ricorso ad un filtro di Kalman (Jun et al., 2005), che ha portato a risultati egregi. Per il rumore a treno fermo si è implementata una procedura che va ad eliminare i punti a bassa velocità partendo da una prima stima dell'accelerazione e della frenatura media in corrispondenza delle fermate.

Tuttavia questo non è sufficiente per ottenere un dato di qualità adeguata. Infatti il rumore durante la marcia produce anche un errore sistematico nella stima della velocità. Infatti è possibile notare graficamente questo effetto sovrapponendo ad una cartografia molto precisa, ad esempio la carta tecnica regionale del Friuli Venezia Giulia, un tracciato GPS (figura 6).

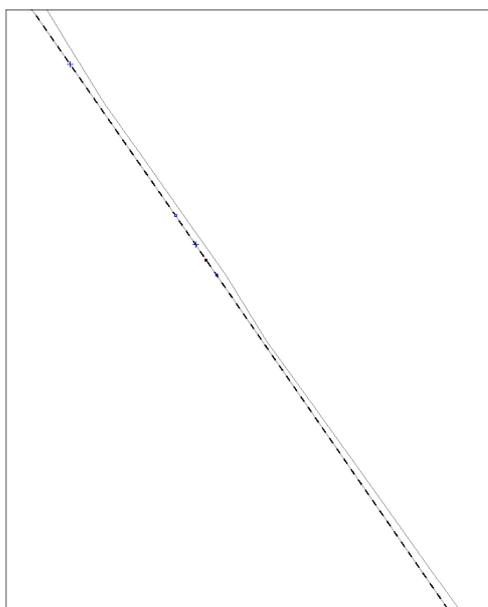


Figura 6: confronto tra tracciato da Carta Tecnica Regionale e misura GPS della linea ferroviaria in prossimità della stazione di Ronchi dei Legionari Nord

Si nota un effetto zic-zac nei confronti della linea. La diretta conseguenza di questo fenomeno è la stima errata, solitamente per eccesso, della distanza percorsa; a sua volta questo fenomeno porta ad un errore di stima della velocità. Questo può essere compensato confrontando la distanza percorsa dal treno misurata dal GPS con la lunghezza della linea ricavata dai dati tecnici della stessa. Dal confronto è possibile calcolare un fattore di compensazione per la velocità in modo da rispettare la distanza percorsa totale su ogni singola tratta percorsa dal treno.

5.2 Prime considerazioni qualitative sui dati

L'ipotesi iniziale di una variazione stocastica di prestazioni del treno dovute a diverse cause sono state confermate da alcune indagini qualitative iniziali: queste analisi hanno permesso di confermare le ipotesi di variabilità nelle diverse fasi della marcia dei treni.

Per condurre tali analisi si è fatto ricorso all'uso di un foglio di calcolo, nel quale sono stati caricati i tracciati GPS di 8 corse di uno stesso treno regionale in arrivo alla stazione di Ronchi dei Legionari Nord (figura 7).

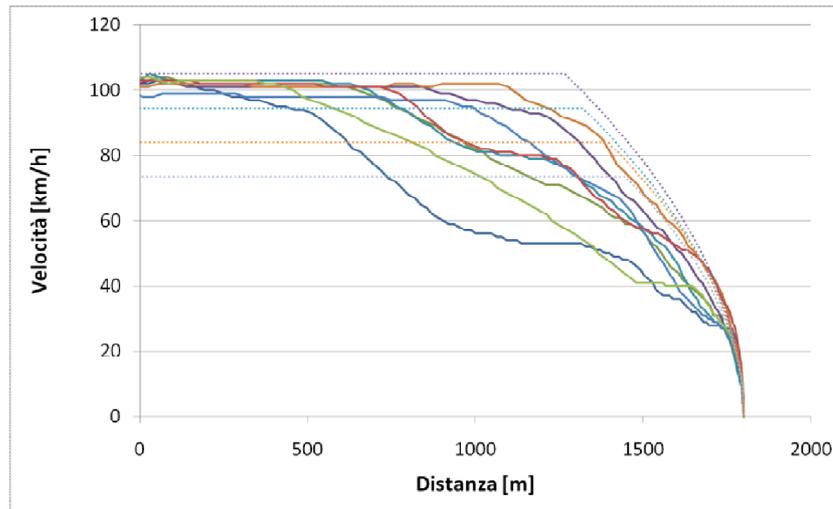


Figura 7: comparazione di frenature reali e frenatura misurate nella stazione di Ronchi dei Legionari Nord

Questi tracciati, riportati con linea continua, sono stati confrontati con i tracciati teorici calcolati con l'equazione di frenatura proposta dall'UIC per quattro diverse percentuali di prestazione, riportati in linea tratteggiata. La differenza di prestazioni in frenata tra le diverse corse è vistosa, come è anche vistosa la differenza tra la singola corsa e le prestazioni teoriche. Si può notare anche che tutte le corse mantengono una velocità iniziale prossima al limite della tratta che è di 105 km/h.

Per condurre analisi più dettagliate il foglio di calcolo si è dimostrato insufficiente, rendendo necessario lo sviluppo di uno strumento software adeguato allo scopo.

5.3 Modello dell'infrastruttura

Prima di elaborare i dati è necessario scegliere un modello di infrastruttura ferroviaria a cui rifarsi per modellare correttamente i dati di cui si è in possesso.

In letteratura si possono trovare tre possibili modelli di infrastruttura ferroviaria: macroscopico, mesoscopico e microscopico.

Il modello macroscopico è un grafo nel quale i nodi rappresentano le stazioni e gli archi rappresentano le linee che le collegano. Gli archi contengono informazioni quali le velocità massime consentite e il

gradiente di ascesa mentre mancano completamente le informazioni riguardanti i segnali. Benché questi modelli siano molto usati in fase di pianificazione dell'orario e nel calcolo del tempo di percorrenza, non è possibile utilizzarli nel nostro caso proprio a causa della mancanza di informazioni relative ai segnali.

Il modello mesoscopico rappresenta un'estensione del modello macroscopico che contiene anche le informazioni sui segnali. Questo modello di infrastruttura non è utilizzabile a causa del dettaglio troppo basso delle informazioni sull'infrastruttura, soprattutto nelle stazioni. In un modello di questo tipo dettagli quali gli itinerari multipli all'interno delle stazioni non sono rappresentabili: poiché la loro lunghezza è diversa è importante calcolare l'esatta distanza percorsa dal treno in modo tale da calcolare correttamente il fattore di correzione della velocità.

Il modello microscopico è in assoluto il modello più dettagliato dell'infrastruttura ferroviaria. Esso rappresenta in maniera dettagliata ogni parte dell'infrastruttura ferroviaria. Ogni segnale e deviatoio è rappresentato con tutte le relative proprietà funzionali in modo da riprodurre correttamente il funzionamento. Questi enti sono modellati su di un grafo in corrispondenza dei nodi, mentre i binari sono modellati come gli archi che collegano tra loro i nodi. Questi modelli sono solitamente complessi, poiché contengono anche diverse migliaia di nodi e altrettanti archi: basti pensare soltanto al numero di deviatoi e segnali di una grande stazione quale Roma Termini. Tutto questo dettaglio, che a prima vista può sembrare eccessivo, permette però di riprodurre correttamente il funzionamento di un'infrastruttura ferroviaria.

I modelli microscopici non sono tutti uguali: una importante suggerimento è stato avanzato da Markus Montigel (Montigel, 1994), il quale propone un modello microscopico di infrastruttura chiamato "double vertex graph" che permette di modellare correttamente i deviatoi, consentendo così di automatizzare alcune operazioni che devono essere effettuate sull'infrastruttura per riprodurre correttamente il percorso dei treni.

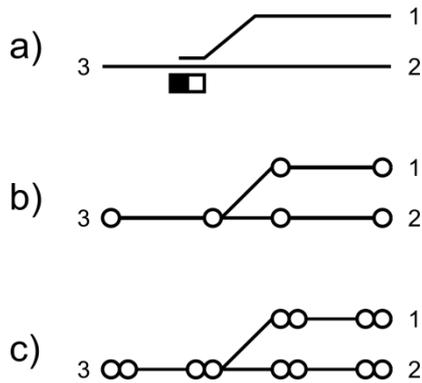


Figura 8: diverse rappresentazioni grafiche di un deviatoio

In figura 8 è possibile vedere la differenza di rappresentazione grafica di un deviatoio secondo tre diversi schemi visivi.

Lo schema *a)* rappresenta, secondo la normativa CEI, un deviatoio con antitallonamento (CEI 3-8 1997) che può essere percorso a velocità di linea sul ramo dritto (quello che da 2 porta a 3) e a velocità massima di 30km/h sul ramo deviato (quello che da 1 porta a 3). Con questa rappresentazione grafica è implicita la non possibilità di instradare un treno da 1 direttamente a 2.

Lo schema *b)* è la rappresentazione visiva di un grafo convenzionale. In questo caso le velocità massime ammesse sugli archi che insistono sul nodo che rappresenta il deviatoio vanno inserite come proprietà degli archi stessi. In questo caso non è possibile specificare all'interno del modello di infrastruttura le restrizioni di ingresso/uscita tra i diversi archi. L'impossibilità di instradare un treno da 1 a 2 deve essere tenuta in considerazione dall'utente ogni volta che viene specificato un itinerario per un treno.

Lo schema *c)* è la rappresentazione visiva del "double vertex graph". La principale differenza rispetto allo schema *b)* è presente nella rappresentazione dei nodi. Con questo modello un itinerario che entra in un nodo da un vertice deve necessariamente uscire dall'altro vertice dello stesso nodo. Seguendo questa regola risulta impossibile instradare il treno da 1 a 2, rendendo maggiormente automatizzabile il processo di ricerca automatica degli itinerari possibili all'interno di una stazione.

L'uso del modello "double vertex graph" per rappresentare un'infrastruttura ferroviaria si è rilevato, negli ultimi anni, il modo più efficiente di rappresentare la realtà, tanto da essere utilizzato anche come modello di infrastruttura ferroviaria all'interno di software commerciali.

Per questi motivi è stato scelto come modello di infrastruttura per le successive analisi.

5.4 Software

Per elaborare correttamente la grande quantità di dati utilizzati è stato necessario sviluppare un applicativo per calcolatore ad hoc. Non essendo disponibile nessun software che potesse essere utilizzato come ambiente di lavoro, si è sviluppato da zero di un applicativo per calcolatore adeguato allo scopo.

Partire da zero per scrivere un applicativo software presenta alcuni vantaggi in termini realizzativi, in particolare la possibilità di scegliere il linguaggio di programmazione e l'ambiente di sviluppo più adeguati per portare a termine con successo il lavoro.

Una prima scelta deve essere fatta sul tipo di linguaggio di programmazione che si vuole utilizzare: linguaggio a memoria gestita o non gestita. Un linguaggio di programmazione a memoria gestita ha il pregio di gestire automaticamente la memoria, liberandola automaticamente dai dati non più in uso dal programma. Questo semplifica di molto il lavoro del programmatore, eliminando la necessità di liberare correttamente la memoria che viene occupata man mano che il programma viene eseguito. Tuttavia la gestione automatica della memoria presenta lo svantaggio di ridurre le prestazioni del software di circa il 20%. Siamo pertanto in presenza di un trade-off complessità di sviluppo / prestazioni: le domande cui bisogna dare una risposta sono frutto del bisogno di prestazioni che si vogliono ottenere da un software. Le prestazioni che si ottengono comunque dal software sono sufficienti allo scopo? Se le prestazioni non sono sufficienti, è possibile riscrivere gli algoritmi in modo da sfruttare tutte le unità di elaborazione presenti su un microprocessore moderno? Se le prestazioni non sono ancora sufficienti, è possibile acquistare un nuovo calcolatore di prestazioni superiori?

Considerando che la programmazione concorrente è molto complessa nei linguaggi di programmazione a memoria non gestita, poiché gli algoritmi utilizzati permettono di utilizzare tecniche di elaborazione parallela, è

probabile che l'utilizzo di un linguaggio di programmazione a memoria gestita sia la scelta migliore.

Attualmente i due linguaggi di programmazione a memoria gestita più utilizzati sono Java di Sun Microsystem (ora acquisita da Oracle) e C# di Microsoft. Senza entrare nel dettaglio dei due linguaggi, la cui trattazione sarebbe lunga, è possibile soltanto focalizzarsi sui vantaggi di un linguaggio rispetto all'altro. Il linguaggio Java presenta il grande vantaggio di essere compatibile con la quasi totalità di piattaforme hardware attualmente in commercio; questo perché il compilatore Java non produce un codice direttamente eseguibile dal processore ma un codice intermedio chiamato bytecode. Per eseguire il bytecode è necessario utilizzare una Java Virtual Machine (JVM) che cambia a seconda del sistema operativo utilizzato. Esistono JVM disponibili per la quasi totalità dei sistemi operativi in commercio.

Sebbene anche il linguaggio di programmazione C# non produca direttamente codice eseguibile ma un "intermediate language", questo linguaggio presenta il problema che è ufficialmente supportato soltanto su sistemi operativi Microsoft Windows. Sebbene i sistemi Windows siano quelli più diffusi attualmente sul mercato è bene ricordare la crescente diffusione dei sistemi Linux e Mac OSX: entrambi questi sistemi operativi non dispongono né di un supporto ufficiale né di ambienti di sviluppo integrato (IDE) per il linguaggio C#.

Questa caratteristica, unita alla maggiore semplicità di sviluppo delle interfacce grafiche, ha fatto ricadere la scelta su Java quale linguaggio di programmazione.

All'inizio, lo sviluppo è stato focalizzato sulla costruzione di uno strumento per l'editing dell'infrastruttura in modo tale da poter disegnare graficamente un modello di infrastruttura di tipo double vertex graph (esempio in figura 9).

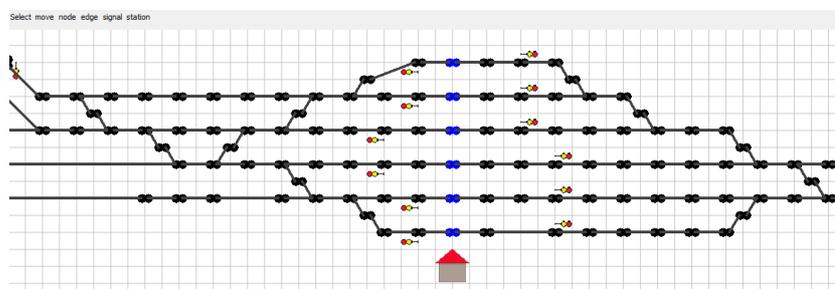


Figura 9: modello di stazione

Una volta costruito il modello di una zona su cui eseguire lo studio, questo può essere salvato su file, in modo da permetterne un utilizzo successivo.

Il software, inoltre, sfruttando le proprietà del double vertex graph, calcola automaticamente tutti gli instradamenti possibili di un treno a partire da ogni segnale presente all'interno dell'infrastruttura disegnata. A partire da un instradamento vengono calcolati automaticamente i gruppi di archi che vengono rilasciati insieme al momento della loro liberazione da parte della coda del treno (rilascio elastico). L'utente ha poi la possibilità di rimuovere gli instradamenti che non sono previsti dall'apparato di controllo dell'impianto ed eventualmente modificare i gruppi di rilascio.

I gruppi di rilascio dipendono dalla disposizione dei circuiti di sicurezza dei binari di stazione e dalla logica di controllo. I sistemi di controllo più moderni permettono il cosiddetto rilascio elastico: man mano che il treno abbandona con la sua coda il circuito di binario in corrispondenza dei vari enti questi vengono liberati per il treno successivo. I gruppi di rilascio sono automaticamente calcolati nel caso in cui l'impianto preveda un rilascio elastico, essendo questo il caso più diffuso.

La funzione dei gruppi di rilascio è di andare a calcolare con precisione quali archi dell'infrastruttura sono occupati per ogni intervallo di calcolo della marcia di un treno e permettere l'utilizzo dei metodi di costruzione dell'orario mediante l'utilizzo dei gradini di occupazione.

Utilizzando questo modello di infrastruttura così predisposto è già possibile sviluppare un calcolatore di tempi di percorrenza, specificando in un'interfaccia separata le caratteristiche meccaniche del mezzo di trazione e del rotabile.

Il metodo proposto è costituito da un certo numero di blocchi sviluppati indipendentemente e successivamente connessi tra loro con le modalità indicate in figura 10. L'algoritmo chiamato "simulated annealing" è stato usato per trovare i valori di prestazione a partire dal tracciato acquisto.

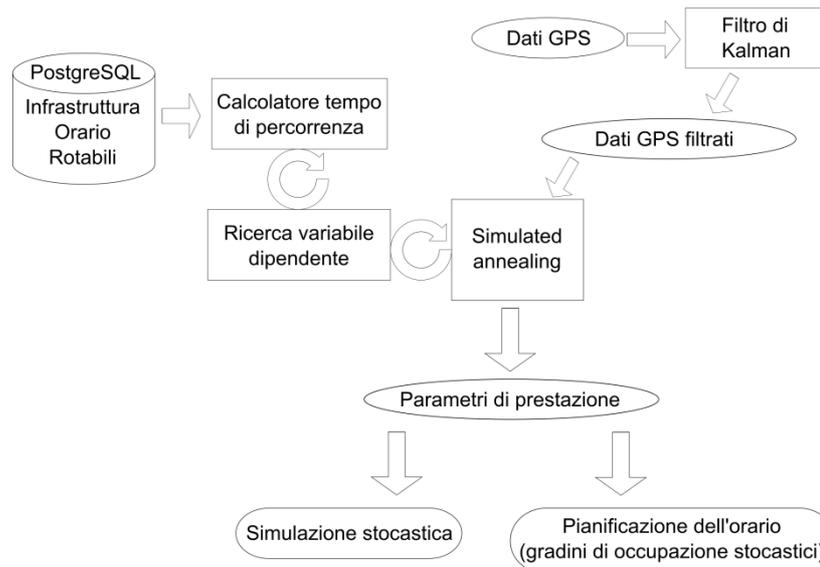


Figura 10: diagramma di funzionamento del software che ricava i parametri di prestazione a partire dalle misure di velocità

5.5 Estrapolazione dell'aspetto dei segnali

I dati filtrati provenienti dal ricevitore GPS mostrano una precisione sufficiente ma non contengono alcuna informazione circa l'aspetto dei segnali: condizione indispensabile per ricostruire il comportamento del macchinista.

Per ovviare a questo problema si utilizza un accorgimento che può essere utilizzato in un caso specifico previsto dal sistema di segnalamento attualmente utilizzato in Italia su alcune linee. Nelle linee attrezzate con il sistema di controllo SCMT senza RSC, il sistema di controllo impone al macchinista di superare il segnale principale a una velocità massima di 30km/h nel caso in cui il relativo segnale di preavviso ne avvisava l'aspetto a via impedita (Malara, 2005). Pertanto, per tenere in considerazione le frenature dovute a segnale con aspetto restrittivo, si procede a controllare la velocità del treno nelle immediate vicinanze di ogni segnale principale: nel caso questa risultasse inferiore ai 30km/h si procede con la memorizzazione dell'aspetto del relativo segnale di preavviso. Non è possibile utilizzare questa metodologia su linee attrezzate con segnalamento di tipo continuo (come ad esempio l'RSC): in

questo caso è indispensabile conoscere gli aspetti dei segnali così come vengono trasmessi al macchinista.

5.6 Stimatore per la verifica dei parametri di prestazione

Durante la calibrazione viene ricercato il miglior set di parametri di prestazione per una singola corsa. Questo calcolo è basato su tre ipotesi:

- 1) Il modello dell'infrastruttura rappresenta esattamente l'infrastruttura usata dal treno, in particolare le posizioni dei segnali, le distanze relative e i limiti di velocità.
- 2) Alla fine della calibrazione, il tempo di percorrenza stimato deve corrispondere esattamente a quello misurato. In altre parole l'insieme di parametri di prestazione deve portare a un calcolo esatto del tempo di percorrenza del treno alla fine della corsa.
- 3) Il periodo di integrazione nel calcolo del tempo di percorrenza deve essere lo stesso del periodo di campionamento del sistema di registrazione. Questo principio semplifica molto l'algoritmo di calibrazione, poiché ogni valore di velocità calcolato corrisponde ad un unico valore di velocità misurato. Il loro confronto può essere utilizzato per ottenere un'indicazione della bontà dell'approssimazione effettuata.

Il metodo utilizzato per confrontare i due insiemi di valori è l'errore quadratico. Il software implementa l'algoritmo (15).

$$MSE = \sum_{t=1}^N (v_{GPS}(t) - v_c(t))^2 \quad (15)$$

Per calcolare un vettore di velocità di lunghezza fissa, è necessario considerare una variabile dipendente e cinque variabili indipendenti. Sebbene la variabile dipendente può essere teoricamente una qualunque delle sei variabili indicate, il software considera la velocità di regime come variabile dipendente per i seguenti motivi:

- 1) Ha una variazione piccola in termini numerici e un valore elevato (sempre superiore al 90% nei dati analizzati).
- 2) La fase di regime è la più lunga durante la corsa di un treno, pertanto una minima variazione del suo valore ha un grande impatto sul tempo complessivo di percorrenza del treno.

3) Il valore di prestazione del regime, mantenendo costanti gli altri parametri, è inversamente proporzionale al tempo di percorrenza.

A causa di 3), il valore della variabile dipendente può essere trovato usando il metodo di bisezione.

5.7 Calibrazione dei parametri

Per trovare i migliori parametri di prestazione possibili, la migliore procedura prevede l'uso di un algoritmo di ottimizzazione. In pratica è necessario risolvere il seguente sistema di equazioni non lineari, minimizzando l'errore quadratico medio (16).

$$\begin{cases} \min \left\{ \sum_{t=1}^N [v_{GPS}(t) - v_C(t)]^2 \right\} \\ v_C = f(a_0, a_1, a_2, \dots, a_n) \\ size(v_{GPS}) = size(v_C) = N \end{cases} \quad (16)$$

Nell'equazione, $a_0, a_1, a_2, \dots, a_n$ sono gli n parametri di prestazione, v_C è la lista di velocità calcolate e v_{GPS} è la lista delle velocità misurate.

Questo appare come un problema di ottimizzazione nonlineare: deve essere trovato un metodo per risolvere il problema; non solo, dal momento che è impossibile determinare a priori le proprietà della funzione obiettivo deve essere utilizzato un metodo robusto. Un certo numero di algoritmi adatti a risolvere questo problema può essere trovato in letteratura (Hiller et al., 2005).

Nei primi test, condotti usando soltanto un parametro per la frenatura e non considerando il lancio, è stato ottenuto il grafico rappresentato in figura 11.

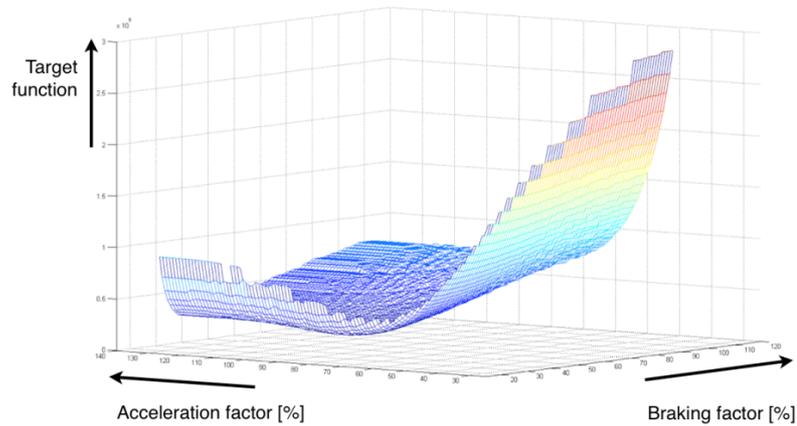


Figura 11: valore della funzione obiettivo (asse z) in funzione dell'accelerazione e della frenatura

Questo grafico rappresenta sull'asse z il valore della funzione obiettivo al variare dei parametri di prestazione dell'accelerazione e della frenatura. Ovviamente il valore del regime non è stato rappresentato perché dipende dagli altri due valori. Dal grafico emerge il valore di ottimo per questa corsa. Il metodo di ottimizzazione "simulated annealing" è utilizzato per trovare i migliori parametri di prestazione che riducono la differenza tra la velocità calcolata e misurata. L' algoritmo inizia trovando una soluzione in un punto casuale della regione ammissibile; in seguito l'algoritmo si sposta casualmente in un intorno del punto precedente per trovare una soluzione migliore. E' necessario limitare il numero di iterazioni che vengono effettuate al fine di limitare il tempo di calcolo.

Alla fine del processo di ottimizzazione, i parametri di performance vengono visualizzati su schermo e salvati in formato testo su di un file, in modo tale da poter analizzare successivamente le distribuzioni dei parametri di prestazione.

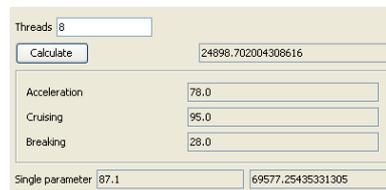


Figura 12: finestra con i risultati del processo di calibrazione

In figura 12 è possibile vedere la finestra contenente i valori dei parametri trovati. Questa finestra si riferisce ai parametri relativi alla figura 11. E'

possibile notare il valore della funzione obiettivo, e dei tre parametri di prestazione ottimi. In basso viene confrontato il valore corrispondente al parametro di prestazione singolo e il valore corrispondente della funzione obiettivo.

5.8 Fattori di prestazione e fasi del moto

L'utilizzo di un fattore di prestazione per calibrare le equazioni del moto viene già usato in alcuni simulatori ferroviari commerciali. Tuttavia l'utilizzo di un unico fattore di prestazione per tutte le fasi del moto si è rivelato insufficiente per una calibrazione ottimale (vedi figura 7). Per ovviare a questo problema è necessario utilizzare parametri separati per accelerazione, regime, lancio e frenatura. Conoscendo l'aspetto dei segnali e l'orario pianificato è possibile separare la frenatura a seconda del motivo per cui questa fase del moto viene innescata: frenatura per fermata in stazione, frenatura per riduzione velocità di linea e frenatura per aspetto del segnale restrittivo. Questa separazione è stata decisa dopo una prima analisi qualitativa delle curve di frenatura reali, che appaiono fortemente dipendenti dal motivo di frenatura. Frenature per fermata in stazione sembrano avere prestazioni molto basse, inferiori sia alle frenature per segnale che alle frenature per riduzione limite di velocità.

I parametri di accelerazione, regime e frenatura sono fattori che vengono moltiplicati rispettivamente per lo sforzo trazione, velocità massima consentita e per la decelerazione in frenatura. Non è possibile utilizzare questo approccio per il coasting, in quanto non si tratta di inserire un fattore moltiplicativo su una grandezza nota, pertanto si è deciso di considerare il coasting come il lasso di tempo durante il quale il treno decelera per effetto delle resistenze al moto. La sua durata è stimata con lo stesso metodo di tutti gli altri parametri durante la procedura di calibrazione.

5.9 Performance e criticità

L'algoritmo del simulated annealing genera in modo euristico una serie di esperimenti, cercando il valore della funzione obiettivo in alcuni punti all'interno della regione ammissibile. Poiché ogni esperimento consiste nel calcolo di un tempo di percorrenza, tutti gli esperimenti sono indipendenti tra loro. Ciò favorisce la possibilità di calcolare contemporaneamente più esperimenti avvalendosi delle caratteristiche dei moderni calcolatori dotati di più processori. L'algoritmo simulated annealing permette di specificare un numero potenzialmente illimitato di parametri di fasi del moto, e di conseguenti parametri di prestazione, avendo la sola controindicazione di un aumento esponenziale della complessità computazionale all'aumentare del numero di parametri. Nel caso specifico dell'utilizzo di sei parametri di prestazione, il tempo di calcolo è di circa 10 minuti su di un personal computer di gamma alta. Inoltre l'algoritmo simulated annealing, benché robusto e capace di trovare una soluzione prossima a quella ottima, presenta alcuni problemi: poiché i parametri di prestazione sono generati con l'ausilio di una funzione che genera numeri casuali con una distribuzione normale, ogni volta che viene eseguito sul medesimo set di dati si avrà un risultato diverso. Queste differenze si sono rivelate inferiori al 2% all'interno del campione oggetto di studio e possono essere considerate ininfluenti ai fini della calibrazione delle equazioni del moto.

Per ovviare a questo problema è possibile tentare due diverse ipotesi di soluzione:

- 1) Utilizzare un algoritmo alternativo al simulated annealing: esistono algoritmi alternativi, tra i quali vale la pena menzionare gli algoritmi genetici, che potrebbero essere utili al fine di ridurre il numero di tentativi atti a trovare la soluzione ottima.
- 2) Dimostrare per via formale che la funzione obiettivo non ha minimi locali: dalla figura 11 è possibile notare che il problema, nel caso di utilizzo di sole 3 variabili, non presenta minimi locali. Dimostrare questo principio per via analitica premetterebbe l'uso di algoritmi di ottimizzazione molto più efficienti, quale, ad esempio, l'algoritmo del gradiente. Questi permetterebbero di ridurre anche di un ordine di grandezza il tempo di calcolo necessario ad eseguire l'intero processo di estrazione dei parametri.

Va precisato che queste possibili soluzioni rappresentano soltanto un ottimizzazioni nell'implementazione dell'algoritmo, con possibili benefici in termini di tempo di calcolo e maggior precisione dei risultati.

6 Caso di studio

Il software sviluppato come spiegato nel capitolo precedente è stato testato sulla linea ferroviaria Trieste-Udine. La linea a doppio binario, elettrificata, è lunga circa 80km e viene utilizzata prevalentemente per il trasporto passeggeri a breve e media percorrenza, oltre ad un moderato traffico merci tra l'Europa dell'Est e l'Italia e tra l'Austria ed il porto di Trieste. La linea è interamente attrezzata con l'SCMT senza RSC: non essendoci ripetizione continua dei segnali vengono soddisfatti i requisiti esposti nel capitolo 5.5.

Sono stati analizzati i dati GPS provenienti da 100 corse con lo stesso tipo di materiale rotabile.

In figura 13 sono stati riportati 4 tracciati misurati, paragonati con il risultato del simulatore al massimo delle performance (100% per tutti i parametri con tempo di coasting pari a 0 secondi) e con il limite di velocità. La calibrazione per il risultato numero 1 è riportata come linea tratteggiata.

Lo strumento calcola i parametri e il conseguente tracciato teorico con un certo margine d'errore rispetto al tracciato misurato. Questo a causa dell'esistenza di fenomeni inaspettati che ne hanno condizionato la calibrazione.

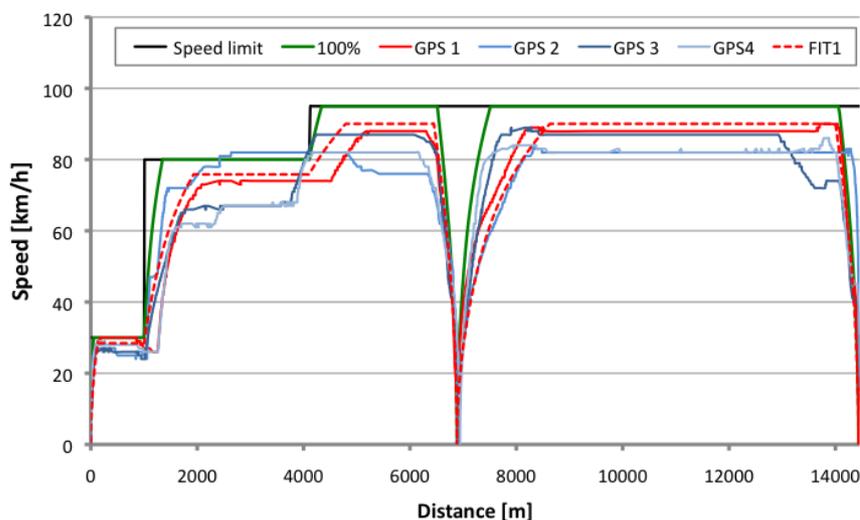


Figura 13: confronto tra velocità calibrata e velocità misurata nella tratta Trieste - Bivio d'Aurisina

6.1 Accelerazione

L'accelerazione di un treno, durante il calcolo del tempo di percorrenza, può avvenire in tre momenti distinti: le partenze alle stazioni, dopo gli aumenti di limite di velocità e per la riaccelerazione dopo un rallentamento dovuto ad un segnale con aspetto restrittivo. Questo ha portato alla formazione di un errore in quanto in partenza i treni accelerano notevolmente (tra il 75 ed il 120%), mentre un'ulteriore accelerazione in linea è spesso influenzata da un ritardo di accelerazione. Del fenomeno del ritardo in accelerazione non si è tenuto conto, pertanto questo inevitabilmente influenza il parametro di prestazione calcolato. Un esempio di questo fenomeno è rappresentato in figura 14.

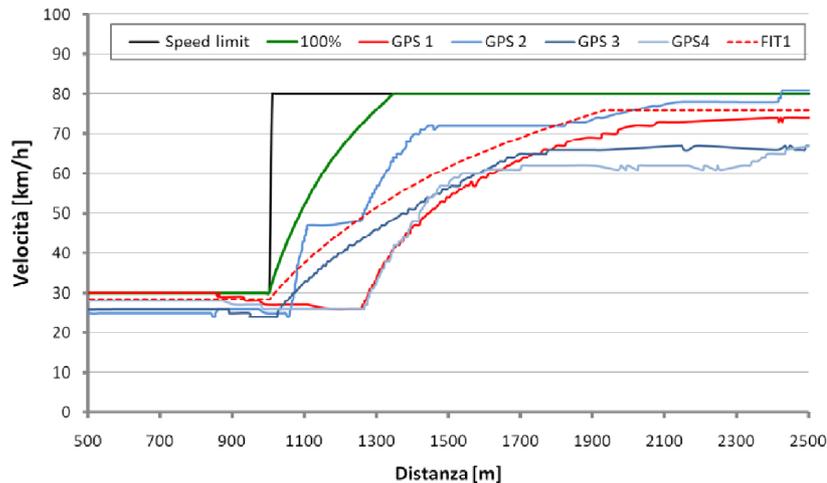


Figura 14: accelerazione in corrispondenza del cambio velocità in uscita dalla stazione di Trieste

Sono stati trovati valori di accelerazione superiori al 100% in alcuni treni in ritardo: complessivamente rappresentano il 5% del campione analizzato. Anche se i dati non sono sufficienti per poter spiegare compiutamente il fenomeno, è possibile dare alcune spiegazioni qualitative. Una spiegazione è che lo sforzo trazione del treno potrebbe essere stato stimato in maniera conservativa. Un'altra spiegazione è che la massa del treno utilizzata per i calcoli è sempre quella massima ammissibile: la presenza di uno scarso numero di passeggeri a bordo del treno potrebbe da solo giustificare tale valore di accelerazione. E' interessante notare che nelle diverse tratte del percorso le prestazioni del

treno non sono omogenee. Per dimostrare questo fenomeno è possibile ricorrere al confronto tra le distribuzioni del fattore di prestazione in accelerazione su due diverse tratte per lo stesso gruppo di treni: la tratta Trieste - Monfalcone (figura 15) e la tratta Monfalcone - Sagrado (figura 16).

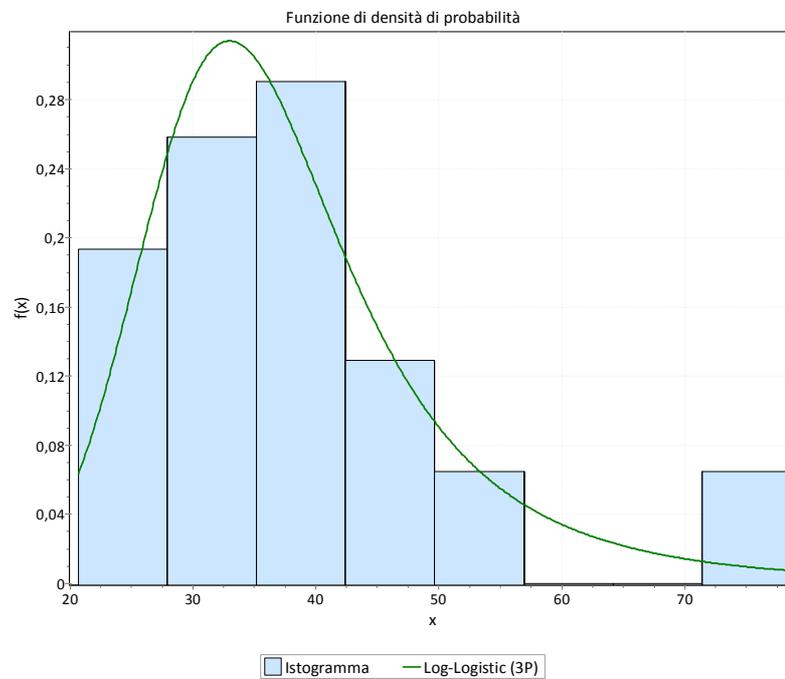


Figura 15: distribuzione del parametro di accelerazione nella tratta Trieste - Monfalcone

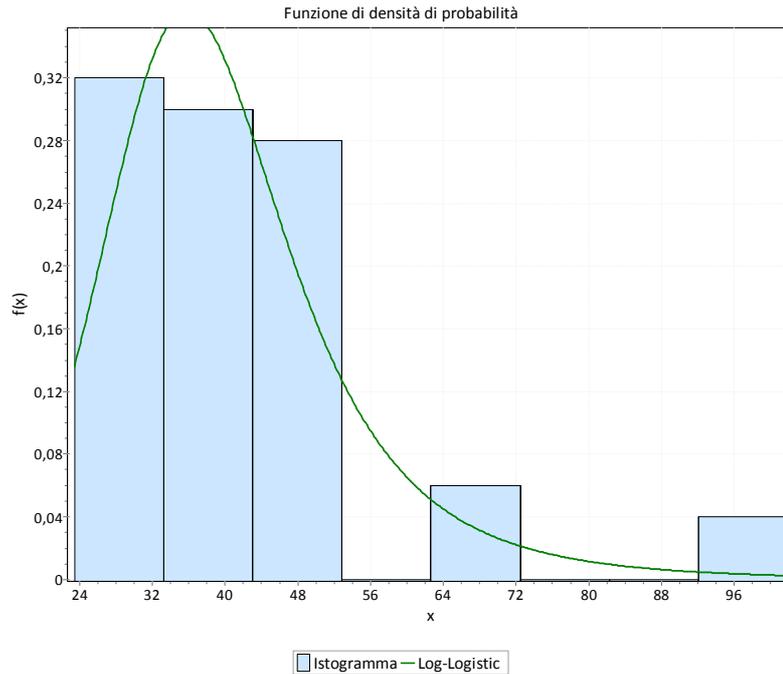


Figura 16: distribuzione del parametro di accelerazione nella tratta Monfalcone - Sagrado

E' possibile notare una certa similitudine tra le due distribuzioni.

A questo punto è necessario fare una precisazione. I treni che partono dalla stazione di Monfalcone in direzione Udine devono percorrere il Bivio San Polo alla velocità massima di 60km/h. Benché il sistema di sicurezza SCMT permetta di superare la velocità limite del bivio nella tratta tra il segnale di partenza della stazione di Monfalcone ed il segnale di protezione del bivio, la totalità dei macchinisti accelera in modo molto limitato, in modo da raggiungere il bivio senza frenare in prossimità del suo segnale di protezione. Questo fenomeno provoca scostamenti significativi tra il tempo di percorrenza teorico e quello misurato. A conferma di ciò si fa riferimento al diagramma riportato in figura 17, dove la prestazione massima teorica si scosta di molto rispetto alle prestazioni reali (curva denominata 100%).

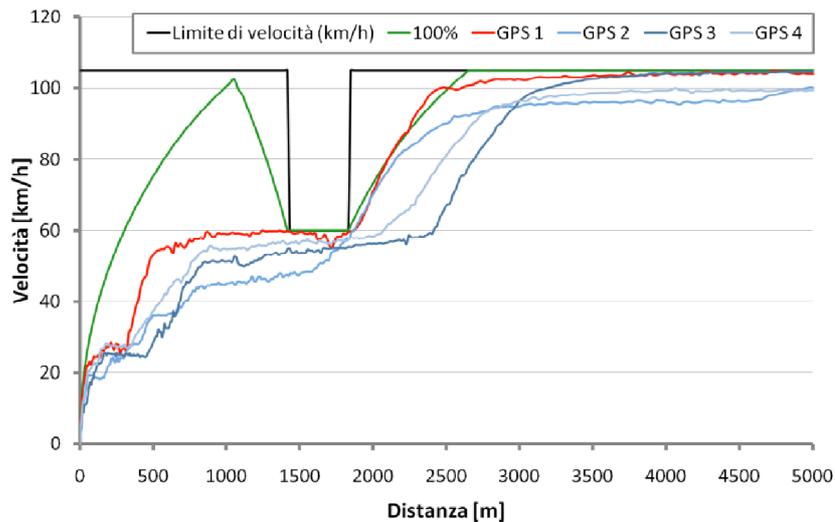


Figura 17: velocità misurate dei treni in corrispondenza di Bivio San Polo (Monfalcone)

Per ovviare a questo problema è necessario utilizzare il principio noto come profili di velocità (Wende, 2003). In pratica il concetto sta nel supporre che i macchinisti non tengono in considerazione solo la velocità massima della linea per determinare la velocità desiderata. Tutti i microsimulatori attualmente in uso non utilizzano i profili di velocità.

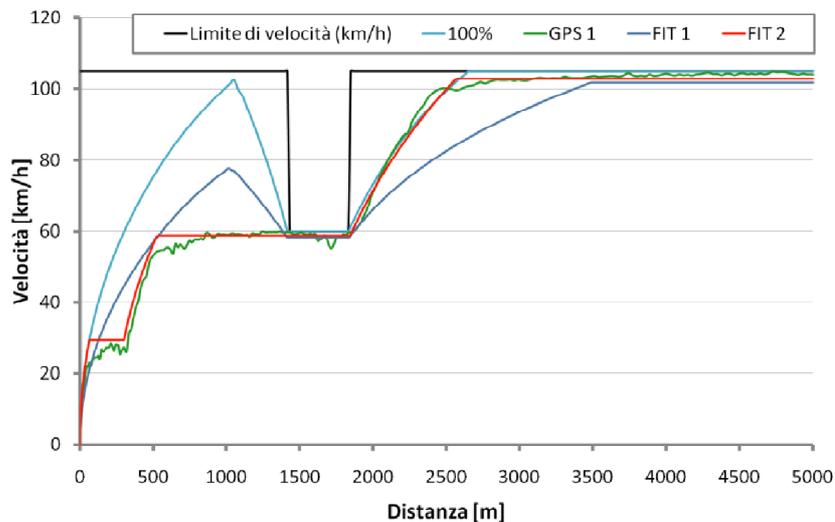


Figura 18: velocità misurata di un treno e confronto con due possibili fit per diversi profili di velocità della linea

La curva tratteggiata denominata FIT 1 rappresenta la curva di velocità calcolata utilizzando i limiti previsti dalla normativa, ovvero senza tenere conto né della limitazione di velocità in partenza dovuta al SCMT (30km/h) né del fenomeno per il quale i macchinisti, evitano di accelerare

sapendo l'approssimarsi a breve distanza di una limitazione di velocità. In questo caso particolare la situazione è aggravata dall'alta sensibilità del SCMT, che impone rigidamente il limite di velocità in corrispondenza degli itinerari su deviata. Il superamento per un tempo superiore ai due secondi della velocità limite del deviatoio fa scattare automaticamente il freno d'emergenza, con un conseguente perditempo molto superiore agli eventuali benefici di una guida più aggressiva. La curva FIT 2 tiene in considerazione questi fenomeni, ottenendo risultati molto superiori rispetto all'applicazione pedissequa della normativa.

Al contrario si è riscontrato un caso, riportato in figura 19, dove un rallentamento non porta necessariamente ad un mancato raggiungimento della velocità di punta nella tratta precedente.

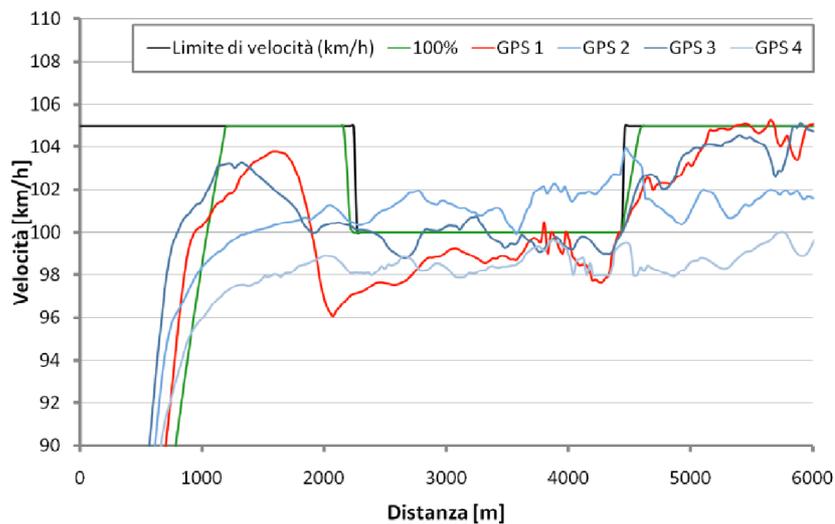


Figura 19: velocità rilevate presso il rallentamento in località Lisert (Monfalcone)

Analogamente all'esempio precedente si procede al confronto della velocità rilevata durante una corsa con quella calcolata sfruttando due diversi profili di velocità.

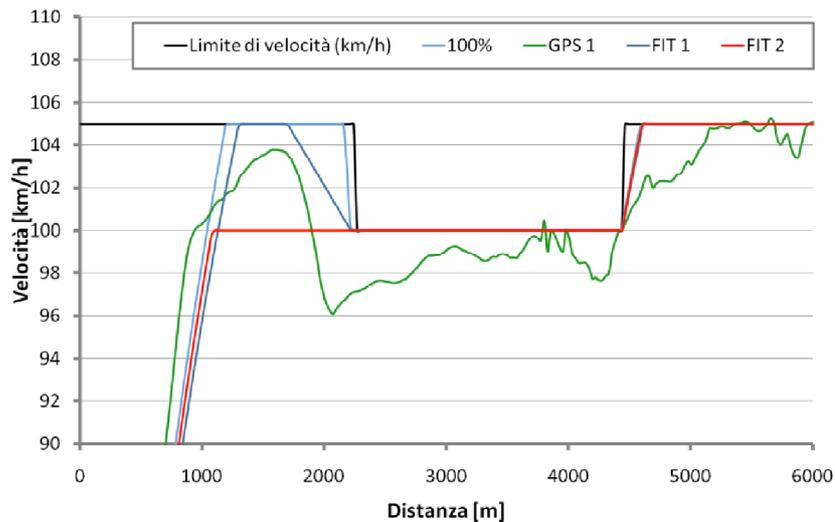


Figura 20: velocità rilevata in località Lisert e relativi fit di velocità

In questo caso è necessario fare una distinzione rispetto al caso precedente in quanto il SCMT non interviene nel caso di superamento del limite di velocità in linea. In questo caso è prevista una tolleranza di 5km/h rispetto al limite di velocità fissato. Un'eventuale frenata non di emergenza viene innescata nel caso di superamento anche della tolleranza; tale intervento porta a un lieve rallentamento, facilmente recuperabile dal macchinista senza perdite consistenti di velocità.

6.2 Regime

I treni in orario ed in ritardo hanno una distribuzione dei parametri molto compatta su tutte le tratte, con valori dal 90 al 100%, vedi figura 21.

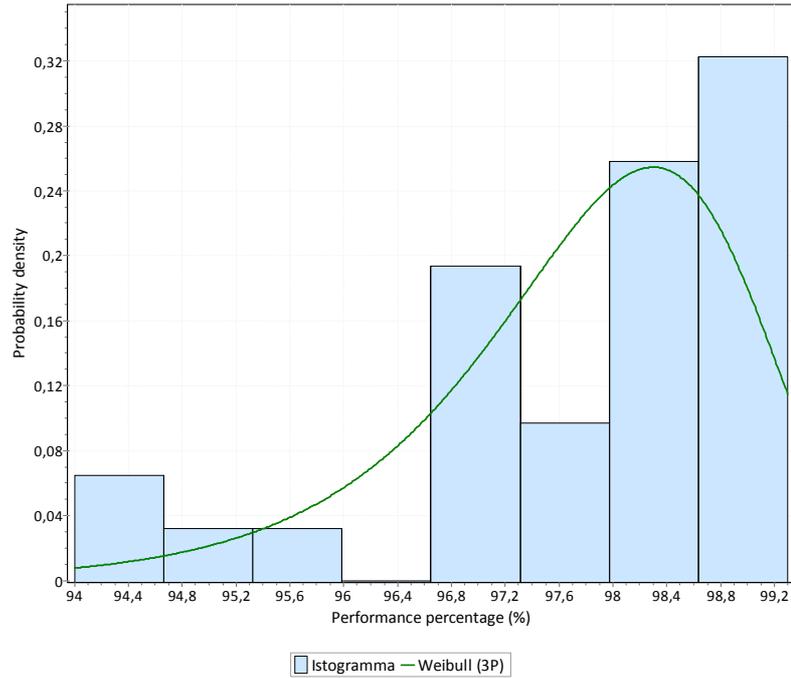


Figura 21: distribuzione del parametro regime

Le variazioni sono dovute solo in parte ai ritardi; la maggior parte dei treni con prestazioni prossime al 100% ha viaggiato puntuale.

Valori inferiori al 95% includono una varietà di fenomeni: dai treni che viaggiano costantemente a velocità ridotta, al differente rispetto dei limiti a seconda del limite stesso di velocità.

In figura 22 è possibile vedere uno dei migliori esempi di questo fenomeno: un treno che viaggia in anticipo mantiene una velocità di 102-103km/h sia con un limite di velocità di 110km/h che nel punto della linea in cui è presente una limitazione di velocità a 105km/h.

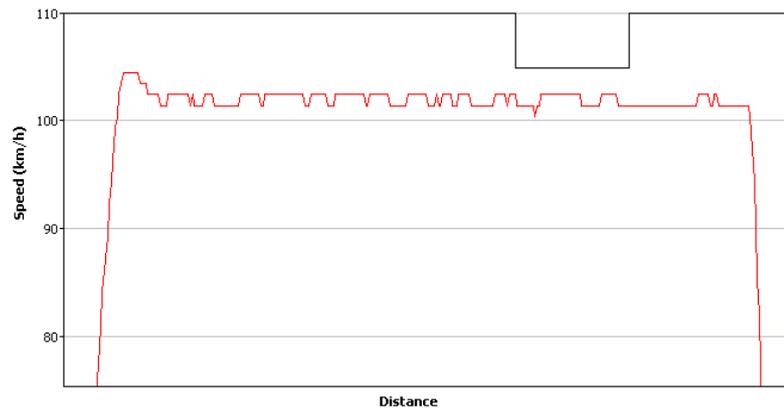


Figura 22: treno che viaggia a velocità significativamente inferiore rispetto al limite permesso

Casi di questo tipo non sono rari e si presentano in diversi punti dell'infrastruttura; va sottolineato che nella totalità dei casi si riferiscono a treni che viaggiano in anticipo.

6.3 Coasting

La fase del moto definita coasting non è stata semplice da modellare. Questo studio ha permesso di quantificare quanto questa fase del moto viene sfruttata effettivamente dai macchinisti. Da quanto si può vedere in figura 23, sembra che il coasting appaia limitato al tempo necessario al macchinista per rilasciare l'acceleratore ed iniziare la frenatura. In circa il 90% dei casi la durata del coasting è inferiore ai 6 secondi: la quasi totalità dei treni che usano il coasting sono treni che viaggiano in orario o in anticipo.

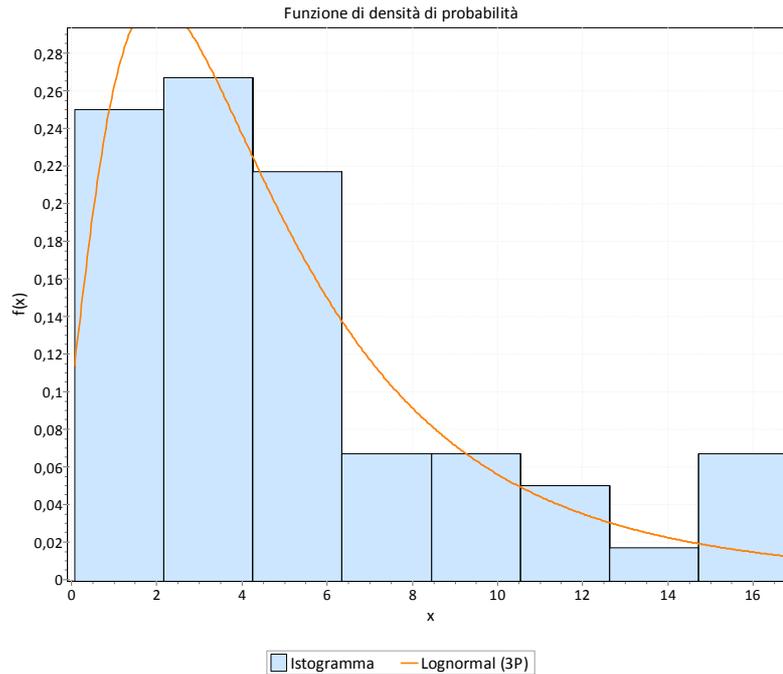


Figura 23: durata del coasting (secondi) nella tratta Trieste - Monfalcone

6.4 Frenatura

Come detto precedentemente, la frenatura è stata separata in tre parametri a seconda del motivo che induce alla frenatura. Questi motivi possono essere la riduzione di velocità di linea, la fermata in stazione e l'incontro con un segnale disposto con aspetto restrittivo.

Riguardo le riduzioni di velocità, è impossibile descrivere il fenomeno statisticamente, a causa del significativo anticipo di frenatura e per i disturbi causati dai treni in anticipo. In ogni caso, i parametri stimati in circa il 90% dei casi è compreso tra il 21 ed il 33%. in questo caso specifico l'anticipo di frenatura andrebbe studiato con maggior dettaglio in futuro, con l'introduzione di un parametro che lo quantifichi.

Per quanto riguarda la frenatura per segnale con aspetto restrittivo, il numero di eventi registrati è insufficiente per ottenere una statistica. Qualitativamente è possibile affermare che il treno decelera rapidamente non appena il macchinista è in grado di vedere il segnale, ancor prima di oltrepassarlo, fino a raggiungere la velocità di circa 30 km/h. La distanza

percorsa dal treno alla velocità di approccio è significativamente più lunga dei 200 metri prescritti dalla normativa.

Questo dato, che sarebbe stato necessario approfondire avendo a disposizione un quantitativo maggiore di tracciati, si discosta notevolmente dalla curva di frenatura attualmente in uso. Questi ultimi stimano la frenatura con il metodo del "tiro al bersaglio", ovvero non iniziano la frenata appena il treno giunge a distanza di visibilità dal segnale di preavviso, ma quando raggiungono la distanza di fermata rispetto al segnale principale successivo. La mancata corrispondenza tra il comportamento reale dei treni e il comportamento simulato dai software commerciali comporta l'insorgenza di un notevole errore di stima.

Per quanto riguarda la stima delle prestazioni alle fermate è possibile fare delle considerazioni di tipo statistico. Il fattore di prestazione appare essere mediamente basso, tra il 30 e il 50%. Prestazioni più elevate, fino all'80% sono state trovate per i treni in ritardo. Di solito la frenatura avviene in due fasi: nella prima la frenatura avviene con prestazioni superiori al 50%, quindi il freno viene gradualmente rilasciato in modo tale da lasciar procedere il treno a bassa velocità fino all'arrivo in prossimità del marciapiede. Negli ultimi metri è presente un'ulteriore frenata che porta il treno a fermarsi completamente (figura 24).

Poiché la formula di frenatura usata è quella convenzionale, così come proposta dalla UIC che prevede una decelerazione costante, i valori trovati si discostano molto da quelli teorici. Ciò nonostante la differenza non è molto marcata ed il modello rappresenta in maniera sufficientemente adeguata i dati reali.

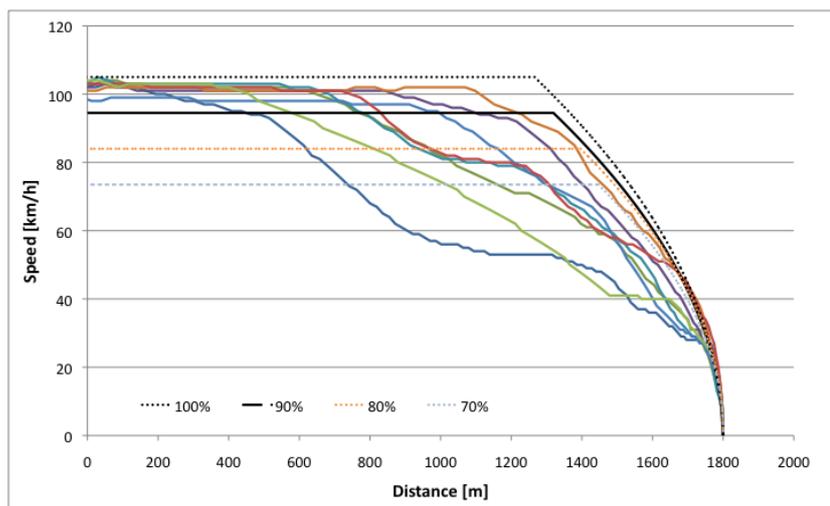


Figura 24: profilo di velocità di una frenatura

6.5 Altre considerazioni

A partire da quello che è stato esposto nei capitoli precedenti, è possibile fare alcune considerazioni ulteriori sui dati rilevati.

In questa fase si è visto che i dati rilevati non sono stati sufficienti ad ottenere alcune distribuzioni, tra le quali quelle di frenatura per segnale con aspetto restrittivo. Altre distribuzioni sono state pesantemente influenzate da fenomeni non previsti in fase iniziale, quale la distribuzione delle prestazioni in accelerazione. Per stimare questi fenomeni, un maggior numero di parametri di prestazione dovrebbero essere introdotti all'interno delle equazioni del moto. Questo problema si scontra però con la scarsa efficienza dell'algoritmo simulated annealing, aumentando esponenzialmente il tempo di calcolo.

Poiché una tale modifica avrebbe comportato la necessità di una riscrittura pressoché totale dell'algoritmo di simulazione, per l'evidente scarsità di dati relativi al fenomeno della frenatura causata da segnale e data l'impossibilità di acquisire i dati necessari in tempi certi, si è deciso di sospendere l'approfondimento della tematica, in vista di futuri sviluppi, visti gli ottimi risultati ottenuti.

7 Tempi di occupazione stocastici come supporto alla pianificazione dell'orario

7.1 Punti di partenza

Nel capitolo precedente è descritta la metodologia con la quale sono state ricavate le distribuzioni dei parametri di calibrazione delle equazioni del moto.

Questi parametri, usati per calibrare le equazioni del moto all'interno di un calcolatore di tempi di percorrenza, portano alla formazione di una serie di tracciati che riproducono, seppure con una certa imprecisione, i tracciati di un treno realmente circolante. Il vantaggio di questa soluzione è la possibilità o meno di introdurre i ritardi secondari all'interno del calcolo. Infatti, una delle difficoltà incontrate nel caso di analisi dei dati macroscopici di circolazione è l'impossibilità di conoscere con certezza un'eventuale conflitto avvenuto durante una corsa. Nel caso in esame, l'unica influenza da un conflitto di circolazione è una frenatura provocata da un aspetto restrittivo di un segnale: questo conflitto è automaticamente rilevato e tenuto in considerazione nel parametro di frenatura per segnale.

Quando si definisce il ritardo iniziale di un treno al momento della costruzione di un nuovo orario ferroviario, è importante escludere tutti i ritardi secondari.

Nel caso qui descritto, sono esclusi tutti i ritardi superiori ai 5 minuti e i conflitti tra i treni in partenza e in arrivo sono filtrati con l'ausilio di un modello mesoscopico in tutte le stazioni principali.

Per queste stazioni e per ogni treno, è preso in considerazione il momento della formazione dell'itinerario e calcolato ogni possibile conflitto tra treni. Sulla base di questi dati, sono stati considerati ai fini statistici soltanto i treni che sicuramente non hanno subito ritardi causati direttamente da altri treni.

Pertanto, la distribuzione dei tempi di partenza di questi treni è dovuta soltanto all'imprecisione del macchinista, causata, ad esempio, da eventuali passeggeri saliti in ritardo, e ad un eventuale ritardo nella formazione dell'itinerario di stazione.

Il tempo di sosta in stazione riproduce due importanti fenomeni che affliggono i tempi di sosta: l'imprecisione in partenza e il tempo di sosta

minimo. Se un treno arriva in stazione in anticipo o puntuale, esso deve necessariamente fermarsi fino all'ora di partenza prevista dall'orario. In questo caso il tempo di sosta è solitamente sufficiente a far salire a bordo tutti i passeggeri, pertanto il treno rimarrà fermo anche se le operazioni di salita e discesa dei passeggeri sono completate.

Se un treno arriva in stazione in ritardo, il tempo di sosta diventa il tempo minimo indispensabile per far salire e scendere i passeggeri. Tale tempo è generalmente molto breve, soprattutto nel caso dei treni regionali misurati. Il tempo minimo è dell'ordine dei 20 secondi per le piccole stazioni servite da treni con pianale ribassato ed ampie porte fino ad arrivare ai 2 minuti nel caso di treni a pianale standard (con presenza di scalini in corrispondenza delle porte) e nelle stazioni ad elevato flusso di passeggeri.

Partendo da queste considerazioni è stato utilizzato un semplice modello basto su due ipotesi:

- 1) Per treni in ritardo, il tempo di sosta è costituito soltanto dalla distribuzione misurata dei tempi di sosta.
- 2) Per i treni in orario e in anticipo, il tempo di sosta è calcolato sia sulla base della distribuzione dei tempi di sosta, sia con l'imprecisione in partenza.

La distribuzione dei tempi di sosta è ricavata analizzando soltanto i treni in ritardo, la variabilità in partenza è calcolata soltanto analizzando la variabilità in partenza dei treni in anticipo.

Unendo i dati di prestazione con i ritardi iniziali e con i tempi di fermata nelle stazioni, è possibile sviluppare un calcolatore di tempi di percorrenza che, tenuto conto di tutte queste variabili, ricostruisca i tempi di occupazione e rilascio delle diverse sezioni di blocco sulle quali il treno è transita durante il suo percorso.

Iterando questa procedura per un elevato numero di set di parametri di prestazione, ricavato da altrettante corse di un treno, è possibile ottenere una distribuzione dei tempi di occupazione delle sezioni di blocco specifica per quel treno.

A questo punto è possibile calcolare, partendo dalle distribuzioni dei parametri di prestazione, una densità di probabilità che un treno occupi una determinata sezione di blocco in un dato istante.

A questo punto è importante fare una considerazione: i comportamenti dei singoli treni all'interno di una "famiglia di treni" possono essere considerati simili all'interno del gruppo stesso. Una "famiglia di treni" è definita come un gruppo di treni omogeneo, ovvero che condivide lo stesso tipo di materiale rotabile, lo stesso percorso, gli stessi tempi di percorrenza e di fermata. Questo perché i maggiori responsabili del comportamento stocastico dei treni sono i macchinisti, i quali ruotano all'interno di turni di lavoro diversi giorno per giorno. In un lasso temporale sufficientemente lungo, è ragionevole supporre che i macchinisti che si avvicendano alla guida dei treni si siano alternati in maniera uniforme all'interno della "famiglia di treni".

La regolarizzazione degli orari, in particolare l'utilizzo a livello continentale di orari cadenzati, riduce il numero di "famiglie di treni" presenti su una linea. A titolo di esempio, in Olanda, dove questo concetto è stato estremizzato, esistono al massimo tre "famiglie di treni" per servizio viaggiatori per ogni linea a partire dall'orario 2009/2010.

In virtù di queste considerazioni, lo strumento può diventare di grande utilità in fase di pianificazione dell'orario, utilizzando una quantità di dati relativamente contenuta.

7.2 Occupazioni stocastiche

Questo approccio è stato implementato per provare le prestazioni su una linea esistente, calibrato con dati reali. Questi dati includono il modello dell'infrastruttura, l'orario, la distribuzione dei ritardi e le prestazioni dei treni.

Data una traccia pianificata, presa dall'orario, il programma richiede l'inserimento di un file di testo, correttamente formattato, contenente i parametri del ritardo iniziale, dei ritardi alle fermate e i set di parametri di prestazione. In questo modo l'utente può modificare a sua discrezione le distribuzioni dei singoli parametri e integrarli con eventuali distribuzioni teoriche in luogo dei dati reali. Un ulteriore vantaggio di questo sistema è quello di salvare i dati di calibrazione su un file, facilmente modificabile dall'utente, senza modificare i dati all'interno di un database. L'utilizzo

del file in luogo di un database ha anche la conseguenza di migliorare leggermente le prestazioni dell'applicazione.

Il tempo di percorrenza e i tempi di blocco sono calcolati 100 volte per ogni treno, partendo dai parametri di prestazione inseriti; questo calcolo produce il diagramma di occupazione probabilistico riportato in figura 25. Più scura è l'area, maggiore è la probabilità che un treno occupi quella sezione di infrastruttura in un dato istante. La scala dei colori è ottenuta mediante trasparenze, dove il grado di trasparenza è automaticamente calcolato in base al numero di iterazioni di ogni treno. Pertanto, aree di uno stesso colore hanno la caratteristica di avere un'occupazione equiprobabile. Vengono anche visualizzati i gradini di occupazione nel caso di un treno che viaggia alla massima prestazione possibile.

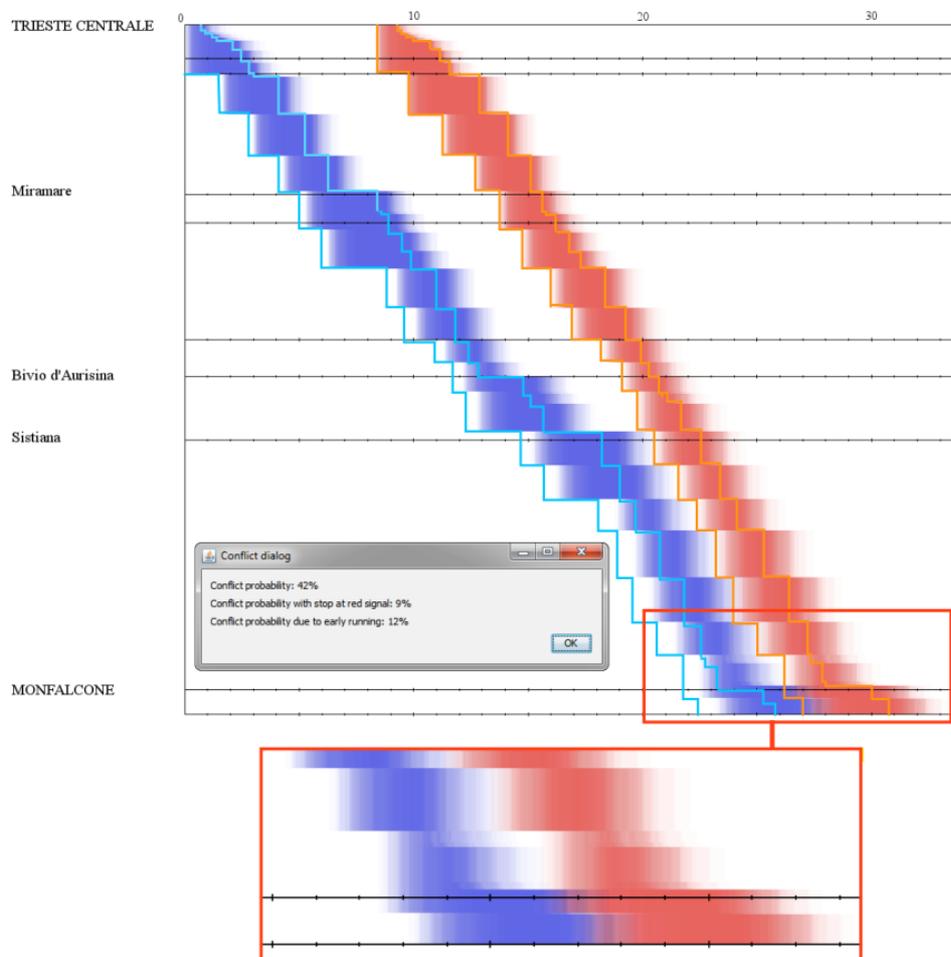


Figura 25: gradini di occupazione stocastici e confronto con valori deterministici

Il caso di studio mostra ottimi risultati sia per l'usabilità del sistema sia per i tempi di calcolo. Su un calcolatore standard il calcolo di una traccia, intesa come una distribuzione di tempi di occupazione di sezioni di blocco, richiede meno di 5 secondi. Dal momento che i dati relativi ai tempi di occupazione sono tenuti in memoria, una traccia può essere traslata o duplicata con un tempo di calcolo trascurabile, senza che questa debba essere ricalcolata. Anche la visualizzazione viene effettuata in tempo reale.

7.3 Probabilità di conflitti

La probabilità di conflitto viene calcolata sulla base di tre possibili situazioni che si vengono a trovare nel caso di sovrapposizioni:

- Probabilità complessiva di conflitto
- Conflitti dovuti a treni in anticipo
- Conflitti che portano a una fermata completa del treno
- Perditempi dovuti ai rallentamenti per conflitto di circolazione

Il sistema è predisposto per tenere in considerazione la presenza di eventuali sistemi di ripetizione dei segnali presente sulla linea: questi sistemi possono influenzare il numero di sezioni di blocco che vengono occupate contemporaneamente dal treno.

Allo stesso modo il comportamento del treno, in caso di conflitto, viene pesantemente influenzato dal tipo di segnalamento utilizzato. Sistemi di segnalamento continuo dei segnali, quali ad esempio l'RSC, prevedono che un treno possa riaccelerare non appena la sezione di blocco successiva viene liberata, senza richiedere che il treno oltrepassi il segnale successivo, come è il caso dell'SCMT. Questo fatto comporta, coerentemente con altri studi precedenti, a un aumento della capacità dell'infrastruttura misurata dovuta a una diminuzione dei perditempi dovuti ai rallentamenti causati da conflitto di circolazione.

Il sistema prevede la possibilità di calcolo della probabilità di conflitto. Questo viene effettuato rapidamente: sono necessari circa 5 secondi per il calcolo per una specifica sezione dell'infrastruttura.

8 Analisi dei piazzamenti in una stazione di testa

8.1 Funzionamento di una stazione di testa

Le stazioni di testa hanno alcune caratteristiche di funzionamento che le rendono diverse dalle stazioni di transito. Il semplice fatto che tutti i treni devono necessariamente invertire la direzione di marcia, una volta giunti in stazione, comporta un notevole aumento dei tempi di sosta. La conseguenza più importante è la necessità di aumentare il numero di binari della stazione per ottenere una capacità sufficiente a sopportare il traffico. L'alto numero di binari incrementa la complessità della stazione. Questo problema è ulteriormente amplificato dalla necessità, per alcuni treni, di compiere una serie di operazioni per il cambio di locomotiva. Le manovre delle locomotive aggiungono ulteriori complicazioni al sistema, poiché le manovre effettuate hanno un impatto non trascurabile sulla capacità complessiva della stazione.

Questi problemi possono essere trattati in maniera statica in fase di pianificazione dell'orario, ma presentano notevoli problematiche al momento dell'analisi dei dati di traffico. Infatti, i ritardi dei treni possono comportare l'insorgere di conflitti nell'assegnazione dei binari di stazione; dato il tempo di sosta di un treno su un binario e il grado di occupazione medio è plausibile che il piazzamento del treno possa variare.

Infine, si può verificare il caso particolare che su uno stesso binario di una stazione di testa si possano attestare due convogli. Questo fatto può capitare anche in stazioni di transito, ma la modellazione è completamente diversa: in una stazione di testa i treni possono essere fatti ripartire esclusivamente seguendo un modello a pila.

La particolarità dei fenomeni che avvengono in una stazione di testa rispetto al caso delle stazioni di transito merita un approfondimento, ma questo è un argomento dove non è disponibile molta bibliografia a riguardo.

8.2 L'apparato di controllo della stazione di Roma Termini

Roma Termini è la più grande stazione d'Italia in quanto a numero di binari e complessità del piazzale di stazione.

In questa stazione confluiscono 6 linee oltre a 2 binari completamente dedicati ai movimenti di manovra verso il deposito di Parco Prenestino. Inoltre sui binari della "Linea Lenta" (binari della linea storica Firenze - Roma) è presente, limitrofo dell'area di stazione, l'Officina Materiale Viaggiatori (O.M.V.), attualmente utilizzata per il rimessaggio dei treni Eurostar.

L'ACS (apparato centrale statico) di Roma Termini, in particolare, davvero imponente per numero di enti di piazzale controllati (circa 1000) e per numero di movimenti potenzialmente controllabili, è basato su un'architettura multiprocessore che prevede più processori con controllo numerico e con verifica continua dei risultati delle rispettive elaborazioni.

Un sistema di diagnostica opera un monitoraggio continuo della funzionalità dell'Apparato e consente di individuare tempestivamente la presenza di guasti, anomalie e stati di degrado. Tale sistema diagnostico lavora in parallelo al sistema di gestione dei movimenti di stazione, attraverso un supporto hardware completamente separato, in modo da annullare la possibilità che malfunzionamenti di uno dei due sistemi possano inficiare l'efficienza dell'altro.

Per eseguire la ricerca sono stati analizzati i dati acquisiti dal sistema ACS di Roma Termini. Questi dati sono conservati su base giornaliera su dei file di testo contenenti i dati relativi ad ogni movimento effettuato in stazione. Per ogni movimento viene registrato, tra le altre cose, il nome del segnale di partenza o protezione azionato, l'orario di apertura del segnale, l'itinerario utilizzato, gli orari di inizio e fine occupazione dell'itinerario.

Questi dati sono sufficienti per condurre un'analisi dei dati riguardanti l'utilizzo dei binari di stazione da parte dei treni.

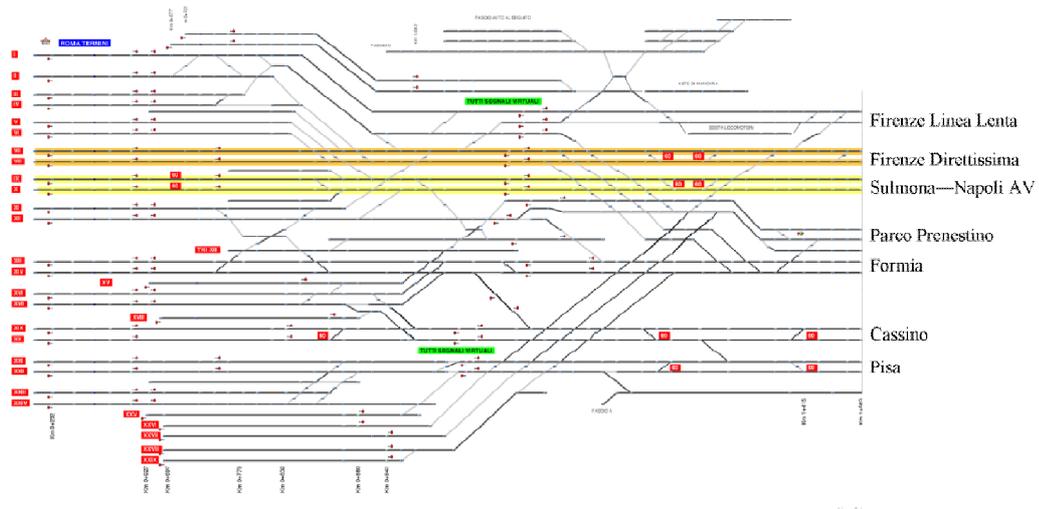


Figura 26: modello microscopico della stazione di Roma Termini

La figura 26 rappresenta graficamente il modello microscopico della stazione di Roma Termini come visto dal software di simulazione OpenTrack. Sul lato destro dell'immagine sono riportati in nomi delle linee in uscita dalla stazione.

8.3 Analisi generale

La base dati utilizzata per lo studio contiene i dati di traffico di tre mesi (giugno, luglio e agosto 2009) rilevati dal sistema di rendicontazione della stazione di Roma Termini. Tutte le elaborazioni effettuate tengono in considerazione i soli giorni feriali; questi sono definiti come i giorni dal lunedì al venerdì che non siano festività nazionali, come ad esempio il 2 giugno o il 15 agosto. Si è deciso di escludere queste giornate per tre motivi:

- 1) Nei giorni feriali la stazione è maggiormente congestionata: i fenomeni di interferenza tra treni in stazione sono più evidenti ed i risultati ottenuti maggiormente significativi.
- 2) L'orario differisce significativamente tra i giorni feriali ed i giorni festivi. Tuttavia alcuni treni circolano giornalmente. Accomunare le statistiche di questi treni per i giorni feriali e per i giorni festivi rappresenta un errore metodologico a causa delle diverse condizioni di traffico del sistema ferroviario.

- 3) Talvolta il piazzamento pianificato, per lo stesso treno, varia nei fine settimana e nei giorni festivi rispetto ai giorni feriali. Per evitare errori nell'elaborazione dei dati è preferibile rimuovere tali giornate dalle statistiche .

Inizialmente si è cercato di confrontare i piazzamenti reali di un singolo treno con il piazzamento pianificato. Il risultato, nel caso del treno ES 9507, è visibile in figura 27, dove si può notare che solamente nel 20,45% dei casi (9 corse su 44) ha rispettato il piazzamento pianificato.

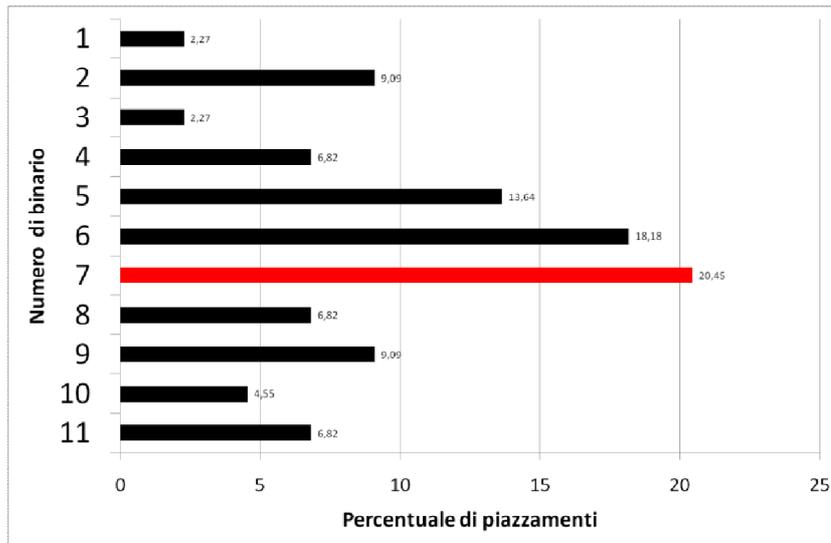


Figura 27: statistica dei piazzamenti del treno Eurostar Italia 9507

Nel periodo preso in esame, è possibile notare come il treno 9507, pianificato sul binario 7, rispetta raramente il piazzamento pianificato. Infatti, il treno arriva in stazione anche su binari diversi da quello pianificato, secondo delle percentuali riportate per ciascun binario. Nella tabella sopra, è riportato il numero di piazzamenti rilevati per ogni binario della stazione. Benché l'analisi del singolo treno porti già alla conferma delle ipotesi formulate precedentemente, sono stati elaborati ulteriori grafici che possano confermare questo fenomeno anche per gruppi di treni.

Nella figura 28 è possibile vedere l'analisi dei piazzamenti dei treni AVfast. In questo caso 358 treni su 875 (40,9%) hanno rispettato il piazzamento pianificato.

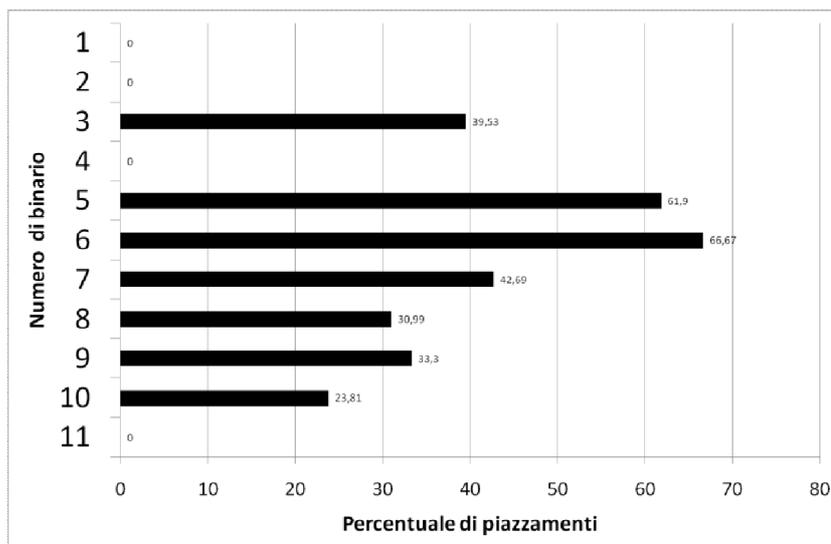


Figura 28: piazzamenti dei treni Eurostar Italia a Roma Termini

Le barre rappresentano la percentuale dei treni pianificati in arrivo o partenza su un determinato binario che hanno rispettato la pianificazione. Nella stessa tabella riassuntiva viene riportata la percentuale di piazzamenti rispettati per ogni treno del gruppo.

Visti i risultati, si è allargato il numero di treni analizzati fino a comprendere tutti i treni pianificati a Roma Termini. Il risultato è riportato in figura 29. La figura riporta la statistica di 49082 treni, di cui 28297 (57,6%) hanno rispettato il piazzamento pianificato.

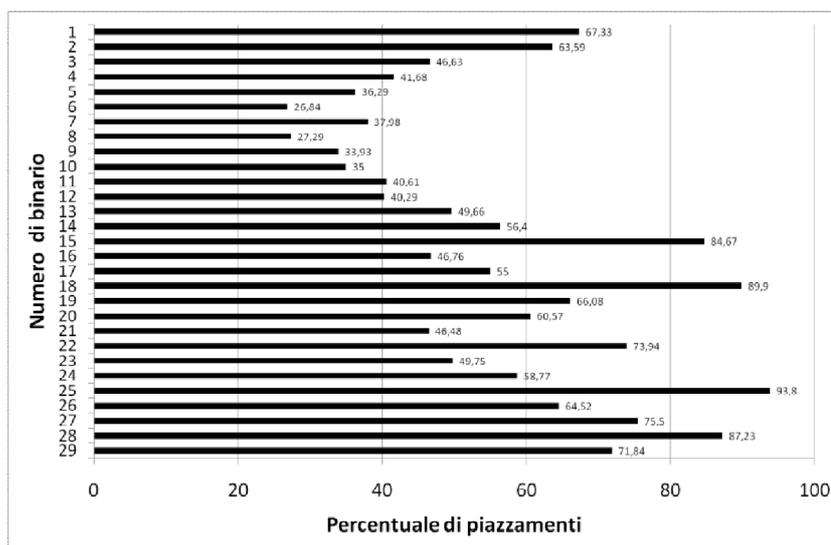


Figura 29: piazzamenti feriali a Roma Termini

Come si può vedere la situazione generale non è ottimale, infatti, nella tabella compaiono dei dati alquanto interessanti: ci sono alcuni treni che nell'arco di tre mesi non hanno mai rispettato il piazzamento pianificato e molti altri che lo hanno rispettato raramente.

E' possibile notare un picco positivo nel binario 25, pertanto si è voluto indagare sul motivo di un risultato così buono per un certo gruppo di treni.

Dopo un controllo dell'orario è emerso che il binario 25 è utilizzato in via esclusiva dal servizio Leonardo Express, ovvero il servizio che porta dalla stazione dell'aeroporto di Fiumicino a Roma Termini.

I risultati di ottenuti confermano le ottime performance ottenute da questo gruppo di treni (figura 30); ben 4090 su 4498 (90,9%) treni hanno rispettato il piazzamento pianificato. Se si eliminano dalla statistica i treni che provengono o sono destinati ai depositi tale numero sale al 94,5%.

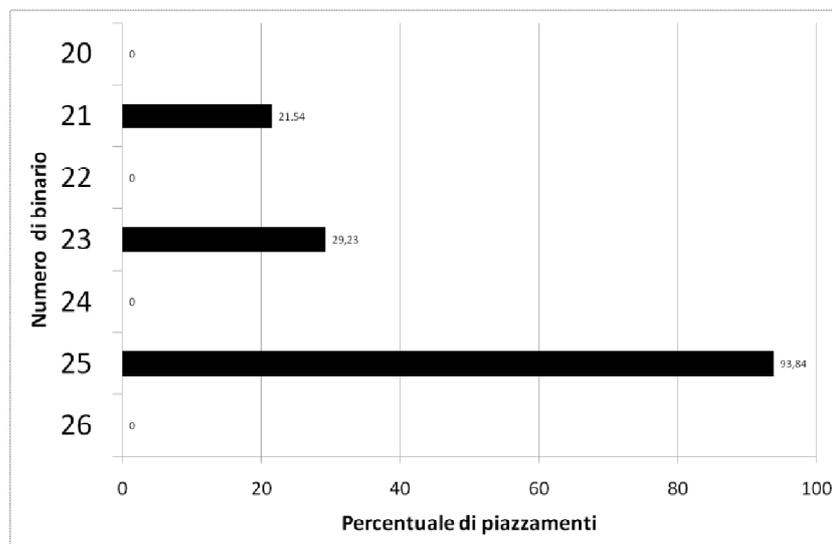


Figura 30: piazzamenti dei treni del servizio Leonardo Express (Roma Termini - Fiumicino Aeroporto)

8.4 Analisi dettagliata

Data la complessità degli eventi che interessano la stazione sotto esame, si è andati ad analizzare il comportamento di gruppi di treni basandosi sulla linea cui questi afferiscono. Infatti, nella stazione di Roma Termini entrano sei linee oltre ad una coppia di binari che porta a Parco Prenestino e all'Officina Materiale Viaggiatori (O.M.V.) che è utilizzata come deposito. Tutti i movimenti verso questo deposito vengono considerate manovre, pertanto nei dati di rendicontazione questi non sono presenti.

Sono stati formati dei gruppi omogenei di treni ripartendo i treni per linea di provenienza, tipologia del treno, arrivo – partenza, fascia oraria. Di seguito andiamo ad analizzare i dati per ciascun gruppo così formato.

8.4.1 Ora di punta del mattino (7-9)

Nell'immagine 31 è possibile osservare i tempi pianificati di occupazione dei binari della stazione di Roma Termini nell'ora di punta del mattino, ovvero della fascia oraria che va dalle 7 alle 9.

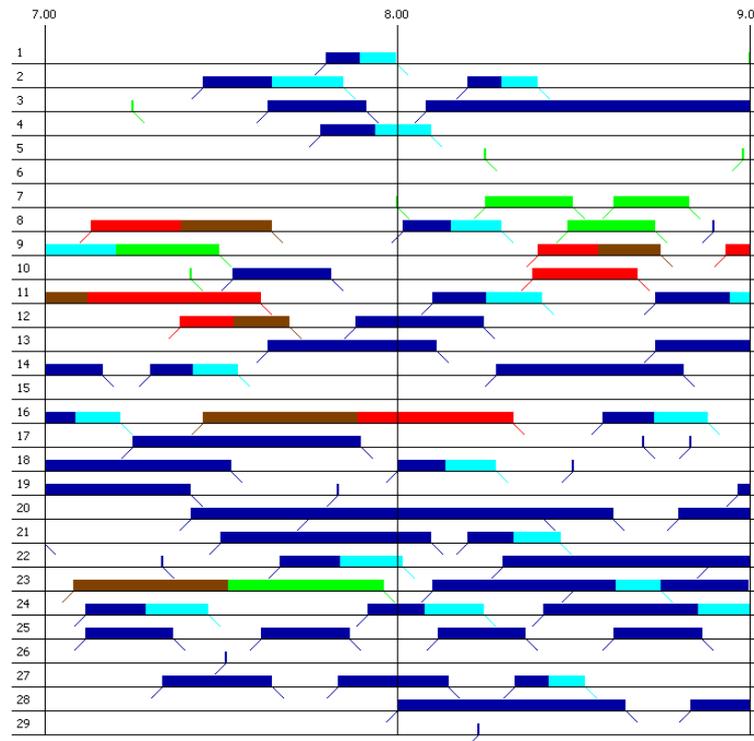


Figura 31: occupazione pianificata dei binari nella stazione di Roma Termini nella fascia oraria 7-9

Com'è possibile notare, nell'ora di punta della mattina, la stazione è quasi completamente satura, rendendo critica la gestione di ritardi superiori alla decina di minuti, in quanto questi comportano inevitabilmente o il propagarsi dei ritardi sui treni destinati al medesimo binario o il piazzamento su uno dei binari limitrofi. Tutto ciò porta a un effetto domino, cioè, non appena un treno ha un ritardo all'inizio dell'ora di punta causerà delle ripercussioni che saranno assorbite soltanto alla fine dell'ora di punta.

Nell'immagine 32 è possibile osservare l'andamento generale di tutti i treni all'interno della fascia oraria in esame. Complessivamente il 62% dei treni rispetta il piazzamento pianificato, con differenze sostanziali tra i diversi gruppi. La statistica completa, con i treni regionali divisi per linea di afferenza, è riportata in tabella 1.

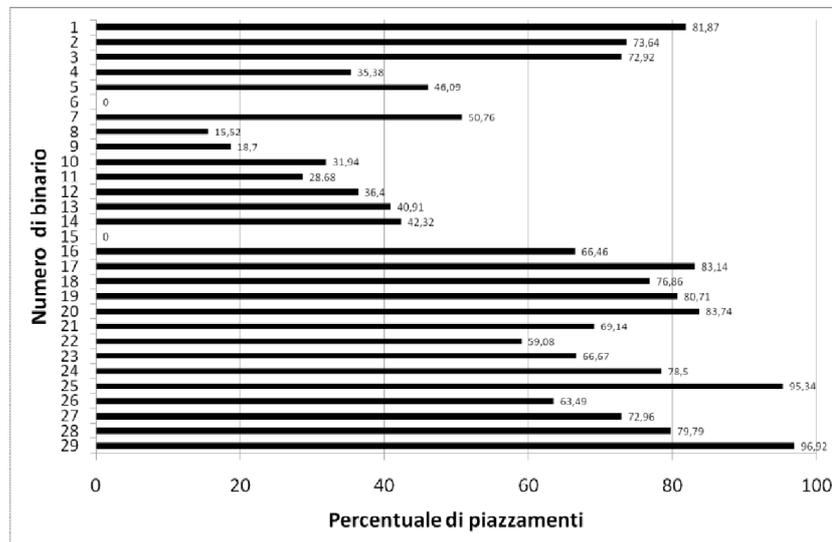


Figura 32: piazzamenti a Roma Termini nella fascia oraria 7-9

Categoria di treni	Numero di treni	Piazzamenti rispettati (%)
Eurostar Italia	687	46,9%
IC ed EXP	461	36,9%
REG (tutti)	4423	67%
REG Direttissima	455	69,2%
REG Linea Lenta	-	-

REG Sulmona	66	25,8%
REG Formia	1047	36,3%
REG Cassino	1692	75,7%
REG Pisa	1163	82,5%

Tabella 1: piazzamenti delle diverse categorie di treno nella fascia oraria 7-9

Nell'immagine 33 è possibile osservare il comportamento dei treni Eurostar Italia che sono i treni a priorità più elevata circolanti sulla rete ferroviaria nazionale. E' possibile notare che nonostante l'indice di occupazione dei binari relativamente basso, i treni Eurostar variano frequentemente piazzamento. A causa della loro alta priorità, questi tendono a influenzare i piazzamenti dei treni a priorità più bassa che afferiscono agli stessi binari: intercity ed espressi provenienti dalla linea Direttissima (figura 34).

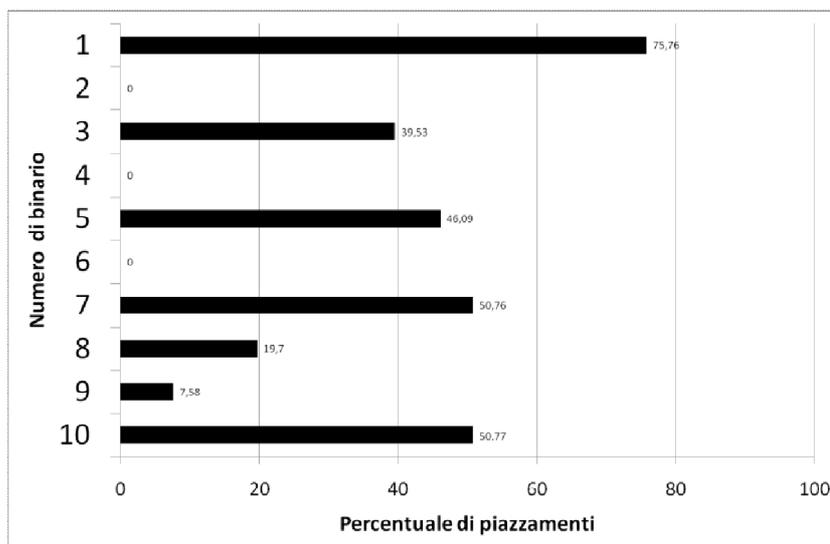


Figura 33: piazzamenti dei treni Eurostar Italia nell'ora di punta della mattina

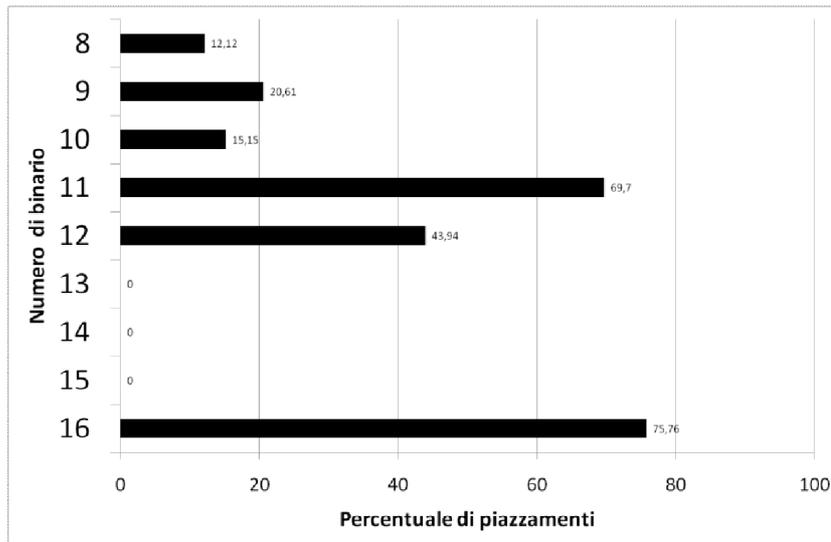


Figura 34: piazzamenti dei treni Intercity ed Espressi nell'ora di punta della mattina

I treni Regionali che provengono dalla linea Direttissima, invece, presentano una variabilità dei piazzamenti molto inferiore (figura 35).

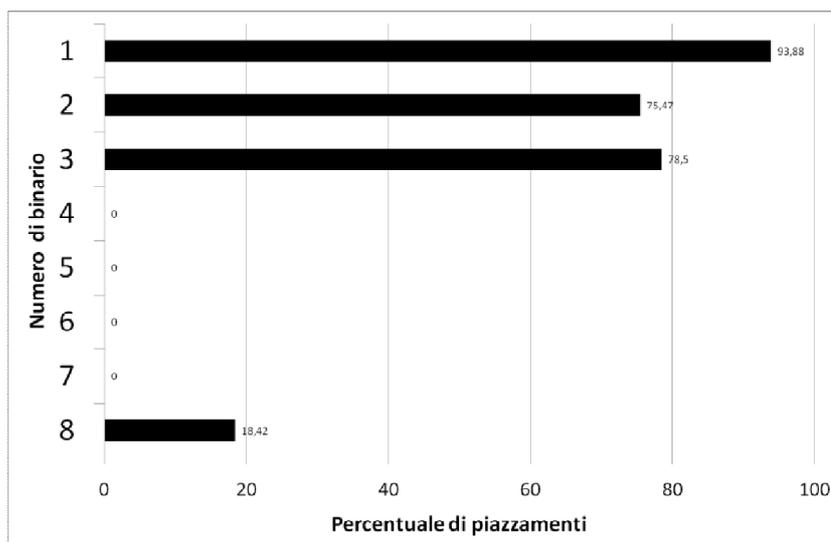


Figura 35: statistica dei piazzamenti dei treni regionali provenienti da Roma Tiburtina (linea Direttissima) nell'ora di punta della mattina

Dalla stazione di Roma Prenestina (linea Sulmona) in ora di punta arriva un solo treno regionale (2371). In figura 36 è possibile notare l'estrema variabilità di piazzamento di questo treno.

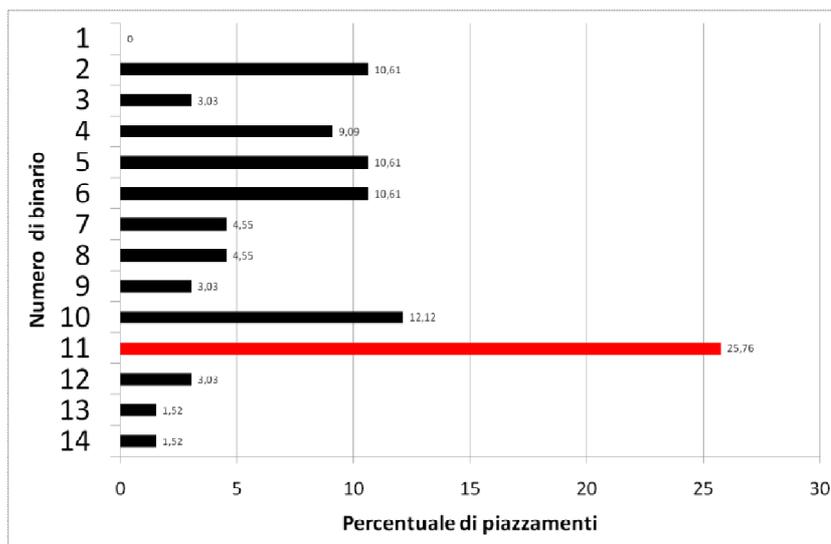


Figura 36: variabilità di piazzamento del treno 2371

A questo punto resta da valutare il comportamento dei treni che afferiscono alle altre tre direttrici a traffico prevalentemente locale.

Nelle figure 37 e 38 sono presenti i piazzamenti dei treni che afferiscono alle linee Formia e Cassino rispettivamente.

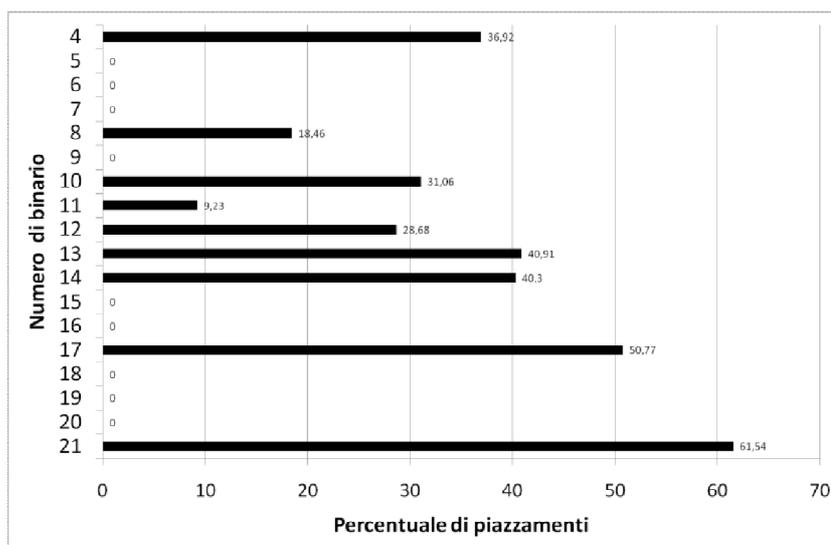


Figura 37: piazzamenti dei treni regionali che afferiscono alla linea Formia

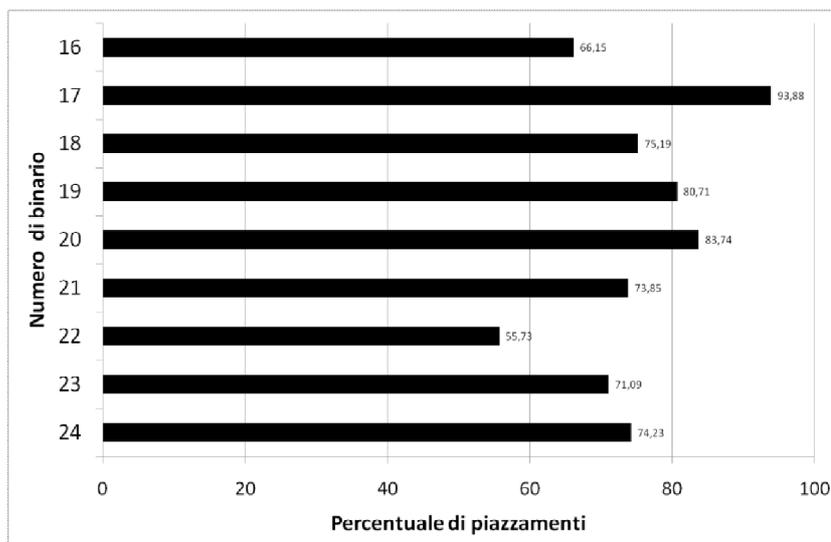


Figura 38: piazzamenti dei treni regionali che afferiscono alla linea Cassino

Come è possibile vedere c'è una forte disparità nella variabilità dei piazzamenti nei due casi. La causa è da ricercare nella diversità dei ritardi che affliggono i treni che percorrono le due linee. Infatti il ritardo medio dei treni regionali in arrivo dalla linea Formia è molto alto, 273 secondi, scartando dalla statistica tutti i treni che arrivano a Roma Termini con oltre mezz'ora di ritardo.

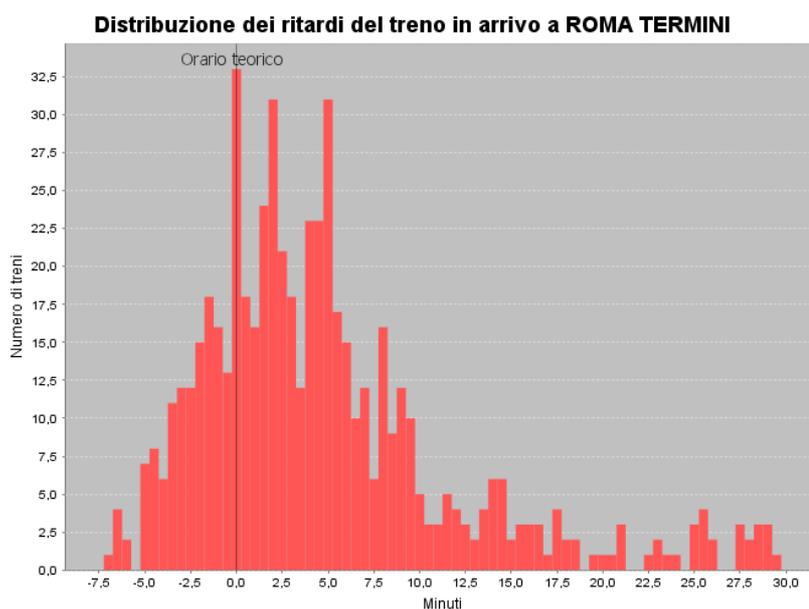


Figura 39: Distribuzione dei ritardi in arrivo a Roma Termini dei treni regionali provenienti da Formia (ora di punta della mattina)

Al contrario, sulla linea Cassino il ritardo medio dei treni è inferiore, 93 secondi, con pochi treni che superano la mezz'ora di ritardo.

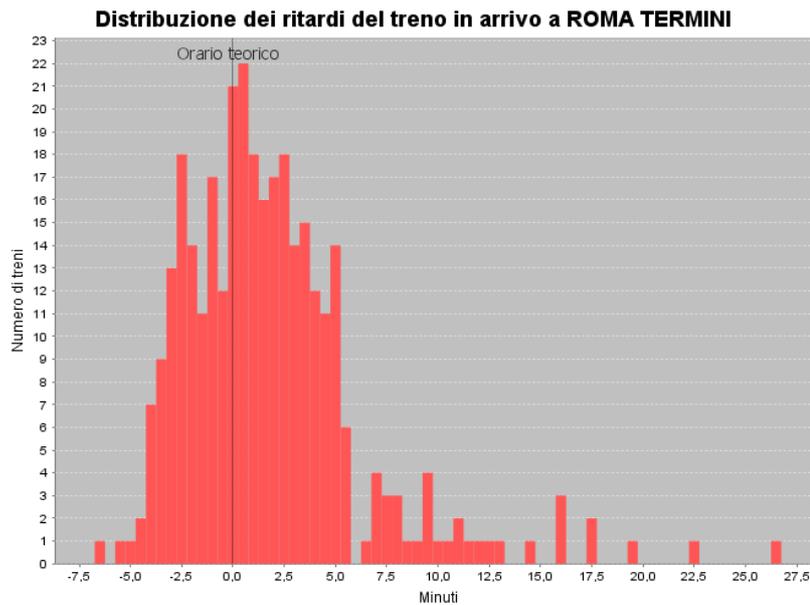


Figura 40: distribuzione dei ritardi in arrivo a Roma Termini dei treni regionali provenienti da Cassino (ora di punta della mattina)

Infine, per quanto riguarda la linea Pisa, la situazione è ottimale: oltre ai già citati Leonardo Express, anche gli altri treni non rispettano i piazzamenti nella maggior parte dei casi (figura 41).

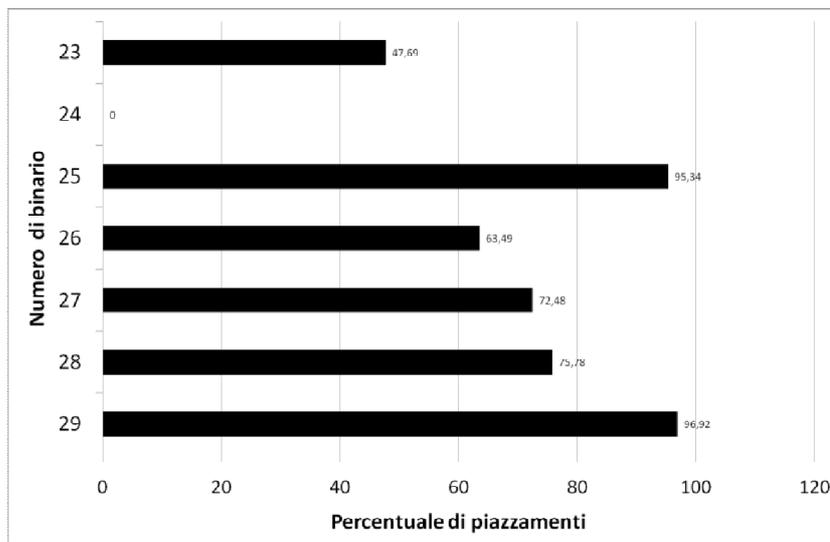


Figura 41: piazzamenti dei treni regionali che afferiscono alla linea Pisa

8.4.2 Ora di punta del pomeriggio (15-18)

Nell'immagine 42 è possibile osservare i tempi pianificati di occupazione dei binari della stazione di Roma Termini nell'ora di punta del pomeriggio, ovvero della fascia oraria che va dalle 15 alle 18.

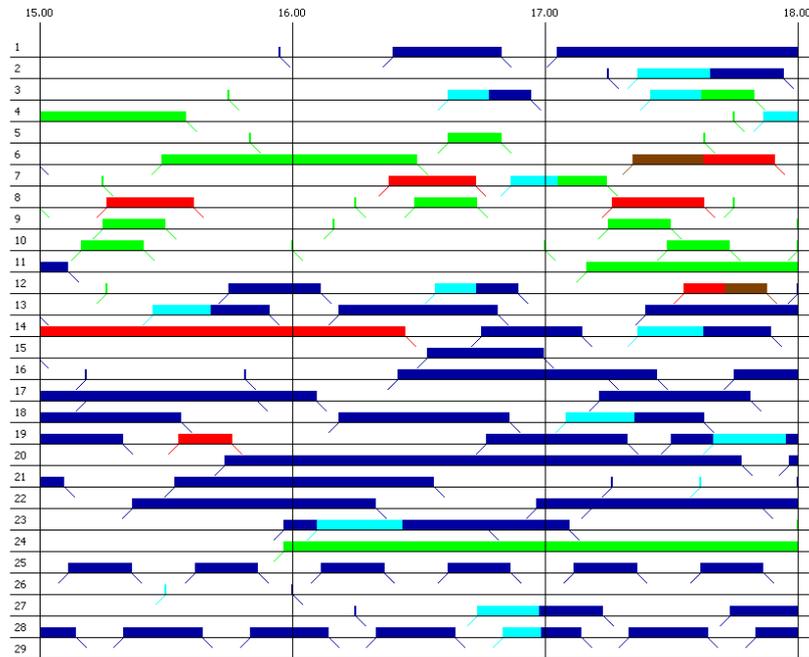


Figura 42: occupazione pianificata dei binari nella stazione di Roma Termini nella fascia oraria 15-18

Com'è possibile notare, nell'ora di punta del pomeriggio, la stazione è satura ancora più del mattino, in particolare di treni a lunga percorrenza sono presenti in maggior numero. Nell'immagine 43 è possibile osservare l'andamento generale di tutti i treni all'interno della fascia oraria in esame. Complessivamente il 62,4% dei treni rispetta il piazzamento pianificato. La statistica completa, con i treni regionali divisi per linea di afferenza, è riportata in tabella 2.

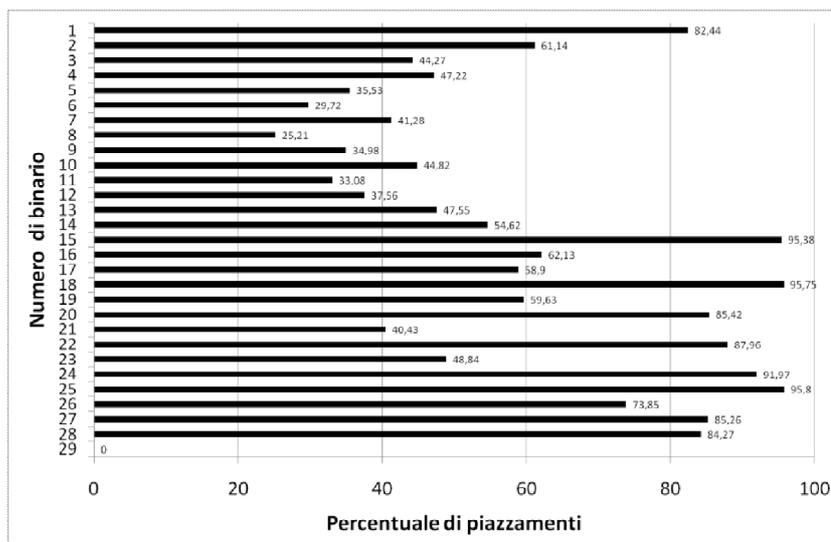


Figura 43: piazzamenti a Roma Termini nella fascia oraria 15-18

Categoria di treni	Numero di treni	Piazzamenti rispettati (%)
Eurostar Italia	1786	42,6%
IC ed EXP	457	32,6%
REG (tutti)	4777	72,7%
REG Direttissima	326	62%
REG Linea Lenta	131	84,7%
REG Sulmona	-	-
REG Formia	978	52,7%
REG Cassino	1807	70,1%
REG Pisa	1535	89,8%

Tabella 2: piazzamenti delle diverse categorie di treno nella fascia oraria 15-18

I treni Eurostar Italia peggiorano ulteriormente le prestazioni rispetto alla fascia oraria di punta della mattina di 4 punti percentuali. La maggior densità di treni pianificati nella parte di stazione che afferisce ai binari delle linee Direttissima e Napoli AV peggiora ulteriormente le prestazioni.

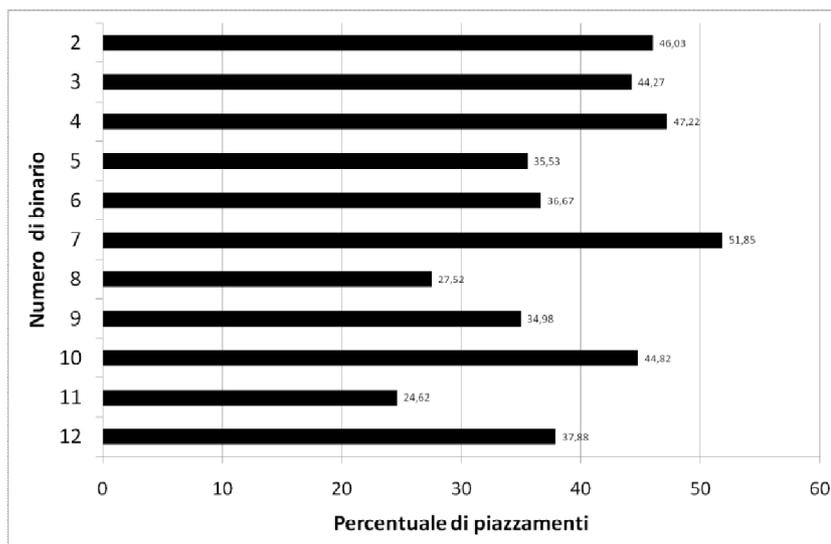


Figura 44: piazzamenti dei treni Eurostar Italia nell'ora di punta del pomeriggio

Stessa sorte tocca ai treni Intercity ed Espressi, con un calo medio di precisione nel piazzamento del 4%.

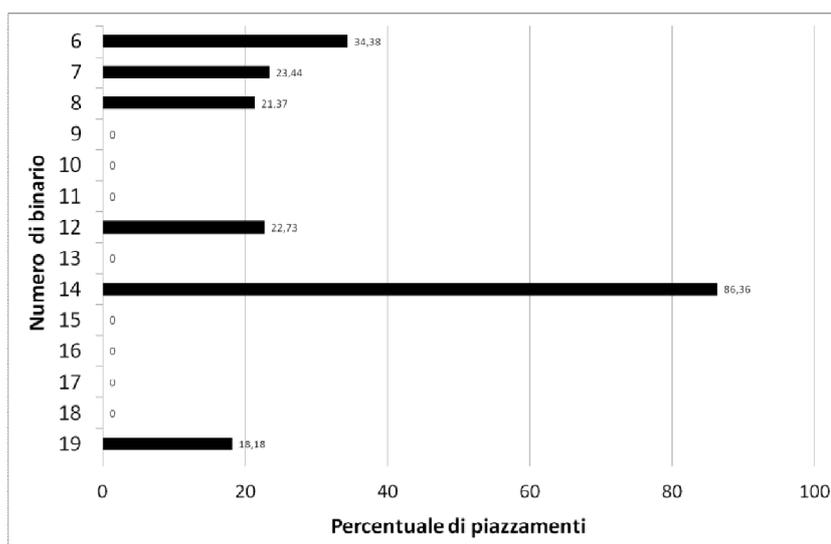


Figura 45: piazzamenti dei treni Intercity ed Espressi nell'ora di punta del pomeriggio

Migliorano le prestazioni dei treni regionali, sfiorando il 90% di precisione nel caso dei treni regionali afferenti alla linea Pisa.

Per quanto riguarda il ritardo medio dei treni in arrivo dalle linee Formia e Cassino misuriamo dei ritardi medi in arrivo rispettivamente di 179 secondi e 204 secondi.

8.5 Limiti dei modelli di simulazione nelle stazioni di testa

Nel capitolo precedente è stato proposto un metodo per analizzare e rappresentare graficamente i dati dei piazzamenti provenienti dalle stazioni di testa. Da queste analisi è emerso come non è possibile ignorare il fenomeno della variabilità dei piazzamenti.

Purtroppo i microsimulatori utilizzati attualmente non sono adatti a rappresentare questo fenomeno. In particolare i tentativi fatti per cercare di riprodurre la variabilità dei piazzamenti con il software di simulazione OpenTrack ha portato a pessimi risultati. Il software di simulazione permette di assegnare ad un treno più di un piazzamento, sia che sia in partenza sia in arrivo in stazione. Quello che non è possibile rappresentare sono i vincoli del materiale rotabile in presenza di un piazzamento non univoco. Infatti, se un treno termina la sua corsa su un binario che non è quello predefinito, questo "scompare" dopo il tempo di sosta in stazione e "riappare" nel binario pianificato al momento della partenza del servizio che utilizza il materiale rotabile del treno precedente. Tale modello non corrisponde certamente ad un comportamento reale di un treno. Inoltre resta da modellare il comportamento degli operatori: cercare di capire su che base questi decidano per lo spostamento di un piazzamento nel caso di più scelte possibili non è banale e la modellazione di questo fenomeno deve essere validata.

L'unico modo corretto di simulare una stazione di testa è quella di ignorare la variabilità dei piazzamenti, fenomeno ampiamente riscontrato nelle analisi effettuate. Se questo è accettabile per una simulazione deterministica, utile per verificare in modo statico un orario, non è corretta per una simulazione stocastica.

9 Conclusioni e sviluppi futuri

Massimizzare l'uso dell'infrastruttura esistente assicurando un'affidabilità sufficiente del servizio è una sfida importante per incrementare la competitività del trasporto ferroviario nei confronti delle altre modalità di trasporto. Una precisione sempre crescente delle operazioni è richiesta sia nelle attività di controllo del traffico che nelle attività di pianificazione dell'orario.

In questo campo, sono state avanzate alcune proposte per stimare delle grandezze con metodi quantitativi al fine di proporre una soluzione ad alcune lacune al momento colmate soltanto dall'esperienza degli operatori.

In questo capitolo verranno riassunti i più importanti risultati ottenuti e proposte alcune tematiche di ricerca.

9.1 Calibrazione delle equazioni del moto

La ricerca effettuata ha avuto il risultato di proporre e validare un metodo concreto per la stima dei parametri di prestazione multipli.

Un utilizzo proposto di tali parametri è all'interno di uno strumento di supporto alla costruzione dell'orario. Questo approccio permette di definire il tempo di buffer come il tempo di distanziamento tra treni in data una certa probabilità di conflitto. Una volta trovati i parametri per la calibrazione dell'equazione del moto il modello di calcolo è estremamente leggero tanto da poter sostituire gli attuali metodi di supporto alla pianificazione dell'orario sui calcolatori moderni.

Attualmente i modelli di microsimulazione ferroviaria utilizzano al massimo un parametro di prestazione per calibrare le prestazioni teoriche di un treno rispetto a quelle misurate. I risultati della ricerca suggeriscono l'utilizzo di un numero maggiore di parametri di prestazione e l'introduzione di metodi migliori per la loro determinazione in modo da migliorare la precisione dei risultati ottenuti.

9.2 Modelli per la simulazione della variabilità dei piazzamenti nelle stazioni

L'analisi della variabilità dei piazzamenti nelle stazioni di testa ha aperto una nuova tematica di ricerca. Il fatto che un treno possa avere una variabilità di tipo spaziale sul suo percorso e non solo temporale necessita di una modifica nei modelli che spiegano i comportamenti di tali stazioni. Per questo motivo i modelli di microsimulazione ferroviaria devono tenere in considerazione la variabilità dei piazzamenti nelle stazioni di testa se devono essere utilizzati per la stima delle prestazioni di queste ultime.

9.3 Futuri sviluppi

9.3.1 Ulteriori utilizzi delle equazioni del moto calibrate

Un possibile scenario che viene aperto dall'utilizzo dei parametri multipli di prestazione è quello del supporto alla formazione del personale di condotta. L'analisi quantitativa dei tracciati, l'analisi dei ritardi ed il confronto con le prestazioni teoriche aprono nuovi scenari nella formazione del personale. Infatti nell'analisi dei dati sono emersi alcuni casi dove i macchinisti, benché in ritardo, non hanno utilizzato al massimo le prestazioni del treno.

9.3.2 Analisi dettagliate sul funzionamento delle stazioni

Lo studio svolto non tiene in considerazione i dati relativi agli invii di materiale rotabile verso i depositi e ai movimenti di manovra a causa della mancanza dei dati necessari. Inoltre i dati relativi agli invii di materiale rotabile sono difficili da trattare, poiché il numero di treno con cui viene effettuata la manovra viene assegnato arbitrariamente dagli operatori. In questo modo non è possibile utilizzare la corrispondenza invio - servizio presente nel modulo M53 di stazione.

Talvolta, soprattutto nelle giornate con forti ritardi o in caso di guasti, i turni pianificati del materiale rotabile vengono modificati sulla base delle esigenze contingenti e tali modifiche non vengono riportate in fase di rendicontazione.

Per questi motivi, uno studio più accurato dovrebbe tenere in considerazione tali fenomeni, non agendo passivamente sui dati ma ricostruendo la presenza reale di treni nei binari, senza tenere conto della pianificazione, integrando i dati delle manovre attualmente mancanti.

Utilizzando un diverso modello di infrastruttura è anche possibile analizzare con maggiore dettaglio i tempi di occupazione dei singoli enti della stazione.

9.3.4 Idee per l'incremento della precisione nella stima dei parametri di prestazione

Ci sono alcune possibilità che potranno essere sfruttate in futuro per migliorare la precisione nella stima dei parametri di prestazione.

Migliorare il metodo di ricerca dei parametri, utilizzando altri algoritmi di ottimizzazione, permetterebbe di utilizzare un maggior numero di parametri per approssimare meglio le equazioni del moto al comportamento reale dei treni.

Sempre sullo stesso argomento, poiché diversi autori forniscono equazioni del moto diverse per rappresentare lo stesso fenomeno, andrebbe verificato quali di queste approssimano meglio la marcia dei treni in condizioni reali.

In Italia per moltissimi anni tutti i mezzi di trazione erano essere dotati di un registratore meccanico della velocità. Questo sistema segnava su un nastro di carta l'andamento della velocità relativamente all'ora ed alla distanza percorsa, oltre che all'aspetto dei segnali per le tratte attrezzate con sistema RSC. A partire dal 2001 la direzione del gruppo Ferrovie dello stato ha deciso di utilizzare un nuovo metodo di registrazione, basato su un registratore digitale anziché meccanico, come parte del Driver Information System (noto come DIS) il cui schema di funzionamento è rappresentato in figura 46.

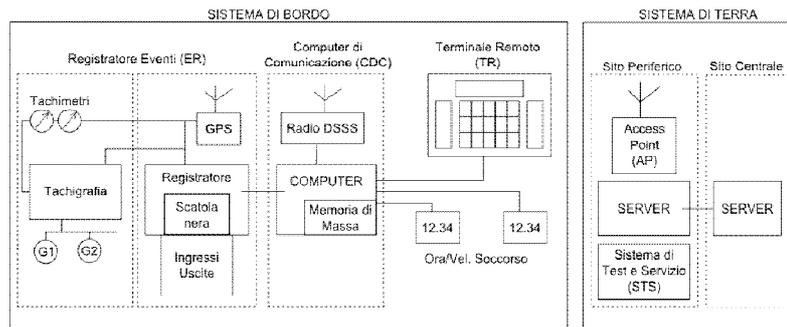


Figura 46: diagramma di funzionamento del DIS (Driver Information System)

Questo sistema registra in modo automatico una serie di dati quali la velocità del treno, la posizione GPS e i dati provenienti da una serie di sensori presenti sul treno; tra questi è importante citare, a titolo di esempio, lo stato di apertura delle porte e la tensione della linea di contatto. Non tutti i sensori sono presenti su tutti i tipi di treno, pertanto la presenza di alcuni tipi di dato è vincolata al tipo di rotabile su cui è montato il sistema. La memoria utilizzata è di tipo standard Compact Flash, correntemente in uso su dispositivi elettronici di uso comune tra i quali macchine fotografiche digitali. Questa scheda di memoria è montata all'interno di un guscio di protezione che assicura l'integrità della stessa in caso di incidente. La scheda di memoria non può essere rimossa in condizioni di esercizio normale, ma soltanto per una sua sostituzione o analisi in caso di incidente. Per questo motivo il sistema prevede la possibilità di inviare all'esterno i dati di una corsa completata sotto forma di Zona Tachigrafica Elettronica (ZTE) mediante connessione radio.

La conoscenza di dati quali la posizione del manettino dell'acceleratore e del freno permetterebbe una ricostruzione dettagliata del comportamento di guida del macchinista. Il confronto dei tempi di chiusura porte e di stazionamento effettivo in stazione permetterebbe inoltre di studiare con maggiore precisione le dinamiche del treno durante le operazioni di fermata per servizio passeggeri.

Bibliografia

T. Albrecht, R. Goverde, V. Weeda, J. van Luipen (2006). *Reconstruction of train trajectories from track occupation data to determine the effects of a Driver Information System*. In: J. Allan, E. Arias, C. A. Brebbia et al., Computers in Railways XI, WIT Press, Southampton.

O. Brünger, (1996). *Konzeption einer Rechnerunterstützung für die Feinkonstruktion von Eisenbahnfahrplänen*, RWTH Aachen, PhD Thesis.

S. Buchmueller, U. Weidmann, et al. (2008). *Development of a dwell time calculation model for timetable planning*. In: J. Allan, E. Arias, C. A. Brebbia et al., Computers in Railways XI, WIT Press, Southampton, 525-534.

G. Cau, *Il sistema DIS (Driver Information System): un salto generazionale nella tachimetria e nel trattamento dei dati di condotta dei rotabili ferroviari*, Ingegneria ferroviaria, numero 9/2001

CEI 3-8 3030 R Seconda 1997-05. *Sigle e segni grafici per i piani schematici degli impianti di segnalamento ferroviario* 60,43 (42,35).

C. Conte (2007). *Identifying Dependencies Among Delays*. Georg-August-Universität, Göttingen. Tesi di dottorato.

W. Daamen, R. Goverde, I. Hansen (2008). *Non-Discriminatory Automatic Registration of Knock-On Train Delays*. Networks and Spatial Economics, Volume 9, Number 1.

S. de Fabris, G. Longo, G. Medeossi (2008). *Automated analysis of train event recorder data to improve micro-simulation models*. In: J. Allan, E. Arias, C. A. Brebbia et al., Computers in Railways XI, WIT Press, Southampton, 575-585.

S. de Fabris, G. Longo, G. Medeossi (2010). *An algorithm for the calibration of running time calculation on the basis of GPS data*. In: N. Ning, C. A. Brebbia, N. Tomii, Computer in Railways XII, WIT Press, Southampton.

S. de Fabris, G. Longo, G. Medeossi (2011). *An implementation of stochastic blocking times to support timetable planning*. In 4rd International Seminar on Railway Operations Modelling and Analysis. Roma.

- W. Ding, J. Wang (2010). *Precise Velocity Estimation with a Stand-Alone GPS Receiver*. Journal of Navigation, Royal Institute of Navigation, 64(1)
- R. M. P. Goverde (2005). *Punctuality of Railway Operations and Timetable Stability Analysis*. Technische Universiteit Delft. Tesi di dottorato.
- R. M. P. Goverde, W. Daamen et al. (2007). *Automatic Identification of Secondary Delays based on Train Describer Systems*. Forms/Format '07 Conference. Branschweig.
- R. M. P. Goverde, Daamen, W. et al. (2008). *Automatic identification of route conflict occurrences and their consequences*. In: J. Allan, E. Arias, C. A. Brebbia et al., Computers in Railways XI, WIT Press, Southampton, 575-585.
- B. Eckel (2006). *Thinking in Java, 4th edition*. Prentice Hall. ISBN 978-8-8719-2303-1.
- A. Furregoni, *L'applicazione del DIS alle locomotive E464*, La Tecnica Professionale, numero 6/2006.
- D. Huerlimann, A. Nash (2003). *Opentrack, simulation of railway networks, version 1.3*. Software manual.
- D. Huerlimann, A. Nash, (2004). *Railway simulation using Opentrack*. In: Allan, J., Hill, R.J., Brebbia, C.A., Sciutto, G., Sone, S. (eds.), Computers in Railways IX, WIT Press, Southampton, 45-54
- D. Huerlimann, G. Longo, G. Medeossi, (2009). *Stochastic micro-simulation as a timetable robustness estimation tool*. In 3rd International Seminar on Railway Operations Modelling and Analysis. Zurigo.
- I. A. Hansen (2010). *Timetable Planning and Information Quality*. WIT Press. ISBN 978-1-8456-4500-7.
- I. A. Hansen, (2004). *Increase of capacity through optimised timetabling*. In: Allan, J., Hill, R.J., Brebbia, C.A., Sciutto, G., Sone, S. (eds.), Computers in Railways IX, WIT Press, Southampton, 529-537.
- I. Hansen, J. Pachel (2008), *Railway timetable and traffic*. Eurailpress. ISBN 978-3-7771-0371-6.
- F. Hillier, G. Lieberman (2005), *Introduction to Operations Research (8thed.)*, McGraw-Hill Science/Engineering/Math.

- J. Jun, R. Guensler, J. Ogle (2005). *Smoothing Methods Designed to Minimize the Impact of GPS Random Error on Travel Distance, Speed, and Acceleration Profile Estimates*. Transportation Research Record; National Academy of Sciences; Washington, DC.
- P. Lukaszewicz (2001). *Energy consumption and running time for trains*. Department of Vehicle Engineering, Royal Institute of Technology, Stockholm. Tesi di Dottorato.
- M. Luethi, D. Huerlimann et al. (2005). *Understanding the Timetable Planning Process as a Closed Control Loop*. 1st International Seminar on Railway Operations Modelling and Analysis. Delft.
- V. Malara (2005), *Apparecchiature di Sicurezza ad uso del Personale di Condotta*, CIFI.
- L. Meester, S. Muns (2005). *Stochastic delay propagation in railway networks and phase-type distributions*. 1st International Seminar on Railway Operations Modelling and Analysis. Delft.
- M. Montigel. (1992). *Representation of Track Topologies with Double Vertex Graphs*. In T.K.S. Murthy, F.E. Young, S. Lehman, W.R. Smith, editor, *Computers in Railways*, vol 2, Washington D.C., 1992. Computational Mechanics Publications
- M. Montigel, (1994). *Modellierung und Gewährleistung von Abhängigkeiten in Eisenbahnsicherungsanlagen*, ETH Zuerich. Tesi di dottorato.
- G. Medeossi (2010). *Capacity and reliability on railway networks: a simulative approach*. Dipartimento di ingegneria civile ed ambientale. Università di Trieste. Tesi di dottorato.
- A. Nash, D. Huerlimann, J. Schuette., V.P. Krauss (2004). *RailML – A standard data interface for railroad applications*, In: Allan, J., Hill, R.J., Brebbia, C.A., Sciutto, G., Sone, S. (eds.), *Computers in Railways IX*, WIT Press, Southampton, 45-54.
- L. Nie, I. Hansen (2005). *System analysis of train operations and track occupancy at railway stations*. European Journal of Transport and Infrastructure Research no. 1/2005, pp. 31-54.
- L. O'Brien, B. Eckel (2002). *Thinking in C#*. Prentice Hall. ISBN 978-0-1303-8572-7.

- G. Piro, G. Vicuna (2000), *Il materiale rotabile motore*, CIFI
- A. Radtke, L. Müller, A. Schumacher, (1998). *DYNAMIS: a model for the calculation of running times for an efficient time-table construction*. J. Allen et al, Proceedings Computers in Railways VI (pp. 309-317), WIT Press, Southampton.
- L. Serrano, D. Kim, R. B. Langley (2004). *A GPS Velocity Sensor: How Accurate Can It Be? – A First Look*. Proceedings of NTM 2004, the 2004 National Technical Meeting of The Institute of Navigation, San Diego, CA, 26-28 January 2004; pp. 875-885.
- B.W.V. Stam - Van den Berg, V.A. Weeda (2007). *VTL-Tool: Detailed Analysis of Dutch Railway Traffic*, 2nd International Seminar on Railway Operations Modelling and Analysis. Hannover.
- R. Stok (2008). *Estimation of railway capacity consumption using stochastic differential equations*. Dipartimento di ingegneria civile ed ambientale, Università di Trieste. Tesi di dottorato.
- UIC,. (2004). *Leaflet 406 - Capacity*. International Union of Railways (UIC).
- M. Ullius (2004). *Verwendung von Eisenbahnbetriebsdaten für die Schwachstellen- und Risikoanalyse zur Verbesserung der Angebots- und Betriebsqualität*. ETH Zuerich. Tesi di dottorato.
- B. Vincze, G. Tarnai (2009). *Development and analysis of train brake curve calculation methods with complex simulation*. IFIP Advances in Information and Communication Technology, Volume 311/2009, 199-211.
- M. Vromans (2005). *Reliability of Railway Systems*. TRAIL Thesis series T2005/7, The Netherlands TRAIL Research School, Tesi di Dottorato.
- D. Wende (2003). *Fahrdynamik des Schienenverkehrs*. Wiesbaden, Teubner Verlag.
- J. Yuan (2006). *Stochastic modelling of train delays and delay propagation in stations*, TRAIL Thesis Series no. T2006/6, The Netherlands TRAIL Research School, PhD Thesis.
- U. Zeppa e F. Ianiello, *Lo sviluppo del Sistema controllo marcia treni (SCMT)*, La Tecnica Professionale, numero 9/2007