

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile



Tesi di Laurea Magistrale

Costruzione di modelli di esercizio ferroviario

Analisi multi-scenario per il potenziamento

dei servizi sulla direttrice Torino - Alba

Relatore: Prof. Bruno Dalla Chiara

Correlatore: Ing. Nicola Coviello

Candidato: Francesco Ragno

Luglio 2019

“Ma chi l'avrebbe detto mai, com'è volato il tempo, la vita forse va così, ti affianca e ti sorpassa. E tu che tiri dritto, che sembra sempre di andar piano, e invece insegui la tua strada, e sei arrivato fino a qui.”

Gianni Morandi, *Grazie a tutti*

Sommario

Con questa Tesi ci si è proposti di studiare le possibilità di potenziamento di servizi ferroviari in ambito regionale attraverso un'analisi multi-scenario a più livelli: lo scopo è stato raggiunto sia da un punto di vista metodologico più generale, sia applicando l'analisi al caso studio della direttrice Torino - Alba.

Nel dettaglio, si approfondisce la possibilità di attuare un servizio con cadenzamento semi-orario oppure due servizi con cadenzamento orario alternati e complementari, compatibilmente con le infrastrutture presenti (a semplice binario per circa due terzi del percorso). Lo studio s'inserisce nel quadro del potenziamento del Servizio Ferroviario Metropolitano di Torino (con inserimento della stazione dell'Aeroporto di Torino-Caselle nel *network* del servizio) e di collegamenti con Regionali Veloci, con attenzione sia nei confronti degli spostamenti dei pendolari sia di quelli turistici.

L'analisi si può definire multi-scenario a più livelli, articolandosi in scenari operativi (modelli di esercizio) e scenari infrastrutturali. Essa si presenta come uno studio completo sull'esercizio ferroviario, contemplando al suo interno la simulazione di un sistema ferroviario, la generazione di orari fattibili e l'analisi degli effetti di perturbazioni stocastiche che modellizzino la variabilità dell'esercizio reale. Tale processo viene applicato sia sull'infrastruttura attuale sia contemplando possibili miglioramenti infrastrutturali.

I metodi di analisi della capacità ferroviaria si possono classificare in metodi sintetici, metodi analitici e – in tempi più recenti – metodi basati su simulazione. Inoltre, nell'approccio analitico va realizzata un'impostazione *ad hoc* per linee a semplice binario. Tra i vantaggi di una simulazione avanzata, come quella effettuata nella Tesi, non vi è non solo la definizione pratica di un modello di esercizio, ma anche la possibilità di valutare il reale comportamento del sistema ferroviario, al di là di un mero approccio deterministico.

Abstract

The scope of this Thesis has been to study possible enhancements of rail services at regional level, through a multi-level and multi-scenario analysis: the aim has been achieved both from a more general methodological point of view and by applying the analysis to the case study of the Turin - Alba railway.

In detail, the possible implementation of a service with periodic timetable is explored, featuring two train paths per hour (30 minutes period) per direction or two alternating and complementary services with the same type of timetable, but each one with 60 minutes period: the compliance with the current infrastructures (single track for about two thirds of the path) is analysed. The study is related to the enhancement of the Metropolitan Railway Service of Turin (with the inclusion of the Turin-Caselle Airport railway station in the network) and of connections with the Fast Regionals trains, with attention to both commuters and tourists.

The study can be defined as a multi-level and multi-scenario analysis, made up of operational scenarios and infrastructural ones. It results in a complete study on railway operations, contemplating the simulation of a railway system, the generation of feasible timetables and the analysis of the effects of stochastic perturbations that represent the variability of the real exercise. This process is applied both to the current infrastructure and to possible infrastructure upgrades.

The methods of analysis of railway capacity can be classified into synthetic methods, analytical methods and - more recently - simulation-based methods. Furthermore, in the analytical approach, an *ad hoc* method should be implemented for single track lines. Among the advantages of an enhanced simulation, such as that performed in the Thesis, there is not only the practical definition of an operational model, but also the possibility of evaluating the real behaviour of the rail transport system, beyond a mere deterministic approach.

Indice

Sommario	III
Abstract 	IV
Indice	V
Indice delle figure	VII
Indice delle tabelle	XI
Capitolo 1: Introduzione	1
1.1 Finalità e obiettivi della Tesi	4
1.2 Inquadramento geografico del territorio.....	7
1.3 Struttura della Tesi	10
Capitolo 2: Analisi della capacità ferroviaria: stato dell'arte	12
Capitolo 3: Metodo di studio	22
3.1 Piattaforma Integrata Circolazione (PIC Web).....	24
3.2 Software SASTRE.....	26
Capitolo 4: Offerta di trasporto e scenario infrastrutturale attuali	31
4.1 Servizio Ferroviario Metropolitano di Torino	33
4.2 Linea SFM 4 e modello di esercizio A (attuale).....	38
4.3 Scenario infrastrutturale 0 (attuale)	41
4.4 Analisi della ripartizione del traffico ferroviario nella parte sud del nodo di Torino tra linea "Genova" e linea "Savona"	47
4.5 Definizione del materiale rotabile	49
Capitolo 5: Statistiche su tempi e ritardi	55
5.1 Tempi di percorrenza minimi	55

5.2	Ritardo in uscita dal nodo di Torino.....	60
5.3	Ritardo in partenza da Alba.....	66
5.4	Tempi di fermata nelle località di servizio.....	67
Capitolo 6: Potenziamento dell'offerta di trasporto		81
6.1	Modello di esercizio B.....	81
6.2	Modello di esercizio C.....	83
6.3	Modello di esercizio D	85
Capitolo 7: Interventi infrastrutturali necessari		87
7.1	Possibili interventi: localizzazione ed effetti previsti	87
7.2	Interventi richiesti per modello di esercizio B.....	94
7.3	Interventi richiesti per modello di esercizio C	101
7.4	Interventi richiesti per modello di esercizio D	110
Capitolo 8: Conclusioni e possibili sviluppi futuri		112
8.1	Raddoppio selettivo Bra - Alba.....	113
8.2	Ripristino fermata Santena - Tetti Giro.....	114
8.3	Integrazione con progetto MetroGranda	114
8.4	Integrazione con riattivazione linee Alba - Alessandria e Alba - Asti.....	116
8.5	Circolabilità dei treni merci.....	117
8.6	Specializzazione del traffico ferroviario nella parte sud del nodo di Torino tra linea "Genova" e linea "Savona"	118
Bibliografia.....		120
Sitografia.....		123
Ringraziamenti.....		127

Indice delle figure

Figura 1.1 - Schema dell'analisi multi-scenario a più livelli elaborata nella Tesi.....	5
Figura 1.2 - Schema di processo seguito nella Tesi per il raggiungimento degli obiettivi preposti	6
Figura 1.3 - Localizzazione del territorio di interesse	7
Figura 2.1 - Tempo di utilizzazione di una sezione di blocco.....	14
Figura 2.2 - Situazioni causa di deadlock su linee a semplice a binario	19
Figura 3.1 - Estratto del modello M53 della stazione di Carmagnola (del 07/03/2018)	25
Figura 3.2 - Estratto della tabella di marcia di effettiva circolazione di un treno del SFM 4 (del 07/03/2018)	26
Figura 3.3 - SASTRE: ambiente di modellazione dell'infrastruttura.....	28
Figura 3.4 - SASTRE: editor dell'orario	29
Figura 3.5 - SASTRE: estratto dell'orario grafico al termine di una simulazione	30
Figura 4.1 - Grafo del Servizio Ferroviario della Regione Piemonte.....	32
Figura 4.2 - Grafo del Servizio Ferroviario Metropolitano di Torino (attuale).....	33
Figura 4.3 - Grafo del Servizio Ferroviario Metropolitano di Torino (possibile potenziamento futuro).....	37
Figura 4.4 - Impegno del nodo di Torino da parte del SFM 4.....	41
Figura 4.5 - Lavori di installazione del nuovo sistema di segnalamento nei pressi di Villastellone a ottobre 2018	43
Figura 4.6 - Stazione di Sommariva del Bosco	44
Figura 4.7 - Ex-stazione (oggi fermata) di Sanfrè.....	45
Figura 4.8 - Fermata di Bandito	45

Figura 4.9 - Stazione di Alba	46
Figura 4.10 - Esempio di caratteristica meccanica di trazione fornita da RFI.....	53
Figura 4.11 - SASTRE: editor del materiale rotabile	54
Figura 5.1 - CDF del ritardo in uscita dal nodo di Torino (fascia di morbida): SFM 4.....	62
Figura 5.2 - CDF del ritardo in uscita dal nodo di Torino (fascia di punta): SFM 4	62
Figura 5.3 - PDF del ritardo in uscita dal nodo di Torino: SFM 4.....	63
Figura 5.4 - CDF del ritardo in uscita dal nodo di Torino (fascia di morbida): RV TO-CN/SV	64
Figura 5.5 - CDF del ritardo in uscita dal nodo di Torino (fascia di punta): RV TO-CN/SV ..	64
Figura 5.6 - Comparazione delle PDF del ritardo in uscita dal nodo di Torino.....	65
Figura 5.7 - CDF del ritardo in partenza da Alba	66
Figura 5.8 - PDF del ritardo in partenza da Alba.....	67
Figura 5.9 - CDF del tempo di fermata a Trofarello (fascia di morbida).....	69
Figura 5.10 - CDF del tempo di fermata a Trofarello (fascia di punta).....	69
Figura 5.11 - Comparazione delle PDF del tempo di fermata a Trofarello	70
Figura 5.12 - CDF del tempo di fermata a Villastellone (fascia di morbida).....	70
Figura 5.13 - CDF del tempo di fermata a Villastellone (fascia di punta)	71
Figura 5.14 - Comparazione delle PDF del tempo di fermata a Villastellone.....	71
Figura 5.15 - CDF del tempo di fermata a Carmagnola (fascia di morbida).....	72
Figura 5.16 - CDF del tempo di fermata a Carmagnola (fascia di punta)	72
Figura 5.17 - Comparazione delle PDF del tempo di fermata a Carmagnola.....	73
Figura 5.18 - CDF del tempo di fermata a Cavallermaggiore (fascia di morbida).....	74
Figura 5.19 - CDF del tempo di fermata a Cavallermaggiore (fascia di punta).....	74

Figura 5.20 - Comparazione delle PDF del tempo di fermata a Cavallermaggiore	75
Figura 5.21 - CDF del tempo di fermata a Sommariva del Bosco (fascia di morbida).....	75
Figura 5.22 - CDF del tempo di fermata a Sommariva del Bosco (fascia di punta)	76
Figura 5.23 - Comparazione delle PDF del tempo di fermata a Sommariva del Bosco.....	76
Figura 5.24 - CDF del tempo di fermata a Bra (fascia di morbida).....	77
Figura 5.25 - CDF del tempo di fermata a Bra (fascia di punta)	77
Figura 5.26 - Comparazione delle PDF del tempo di fermata a Bra.....	78
Figura 5.27 - CDF del tempo di fermata a Santa Vittoria d'Alba (fascia di morbida)	79
Figura 5.28 - CDF del tempo di fermata a Santa Vittoria d'Alba (fascia di punta).....	79
Figura 5.29 - Comparazione delle PDF del tempo di fermata a Santa Vittoria d'Alba	80
Figura 7.1 - Piazzale binari della stazione di Sommariva del Bosco	88
Figura 7.2 - Stazione di Santa Vittoria d'Alba	89
Figura 7.3 - Ex-stazione (oggi fermata) di Monticello d'Alba	92
Figura 7.4 - Fermata di Pocapaglia.....	93
Figura 7.5 - Ex-stazione (oggi fermata) di Mussotto	93
Figura 7.6 - Modello di esercizio B, SFM 4: evoluzione del ritardo medio in corsa (corse dispari)	97
Figura 7.7 - Modello di esercizio B, SFM 4: evoluzione del ritardo medio in corsa (corse pari).....	97
Figura 7.8 - Modello di esercizio B, SFM 4: evoluzione del ritardo medio in corsa (corse dispari)	99
Figura 7.9 - Modello di esercizio B, SFM 4: evoluzione del ritardo medio in corsa (corse pari).....	99

Figura 7.10 - Modello di esercizio C, SFM 4: evoluzione del ritardo medio in corsa (corse dispari)	107
Figura 7.11 - Modello di esercizio C, SFM 4: evoluzione del ritardo medio in corsa (corse pari).....	107
Figura 7.12 - Modello di esercizio C, RV: evoluzione del ritardo medio in corsa (corse dispari)	108
Figura 7.13 - Modello di esercizio C, RV: evoluzione del ritardo medio in corsa (corse pari).....	108
Figura 8.1 - Fermata di Madonna del Pilone	115
Figura 8.2 - Spazio disponibile per l'ampliamento del fascio binari nella stazione di Alba.....	116

Indice delle tabelle

Tabella 1.1 - Elenco dei Comuni serviti dai collegamenti ferroviari oggetto di studio.....	8
Tabella 1.2 - Elenco dei Comuni serviti dalla linea SFM 4 nel nodo di Torino e nel prolungamento verso Nord	9
Tabella 4.1 - Istradamento dei treni in uscita dal nodo di Torino (verso Trofarello).....	48
Tabella 4.2 - Istradamento dei treni in entrata nel nodo di Torino (da Trofarello).....	48
Tabella 4.3 - Categorizzazione dei treni merci	51
Tabella 4.4 - Categorizzazione delle locomotive isolate	52
Tabella 4.5 - Coefficienti selezionati per il calcolo delle resistenze ordinarie specifiche al moto.....	53
Tabella 5.1 - Tempi di percorrenza per percorso Trofarello - Alba (linea SFM 4).....	57
Tabella 5.2 - Tempi di percorrenza per percorso Alba - Trofarello (linea SFM 4).....	58
Tabella 5.3 - Tempi di percorrenza per percorso Trofarello - Alba (linea RV via Cavallermaggiore).....	59
Tabella 5.4 - Tempi di percorrenza per percorso Alba - Trofarello (linea RV via Cavallermaggiore).....	60
Tabella 7.1 - Modello di esercizio B, SFM 4: tempi di percorrenza di riferimento.....	94
Tabella 7.2 - Modello di esercizio B, SFM 4: prima traccia orario dispari della giornata..	95
Tabella 7.3 - Modello di esercizio B, SFM 4: prima traccia orario pari della giornata	96
Tabella 7.4 - Modello di esercizio B, SFM 4: comparazione degli scenari infrastrutturali.....	100
Tabella 7.5 - Modello di esercizio C, SFM 4: tempi di percorrenza di riferimento	101
Tabella 7.6 - Modello di esercizio C, RV: tempi di percorrenza di riferimento.....	102
Tabella 7.7 - Modello di esercizio C, SFM 4: prima traccia orario dispari della giornata...	103

Tabella 7.8 - Modello di esercizio C, SFM 4: prima traccia orario pari della giornata.....	104
Tabella 7.9 - Modello di esercizio C, RV: prima traccia orario dispari della giornata.....	105
Tabella 7.10 - Modello di esercizio C, RV: prima traccia orario pari della giornata	106
Tabella 7.11 - Modello di esercizio C, SFM 4: comparazione degli scenari infrastrutturali ..	109
Tabella 7.12 - Modello di esercizio C, RV: comparazione degli scenari infrastrutturali	110
Tabella 8.1 - Limiti di circolabilità sulle linee di interesse	117

Capitolo 1

Introduzione

Una problematica di rilievo nel mondo attuale è lo spostamento di grandi quantità di persone in zone ad alta densità abitativa, quali le grandi città e i relativi hinterland. Tale massa di viaggiatori risulta tipicamente costituita dai pendolari, dunque per la maggior parte da studenti e lavoratori, ma nel caso in cui si analizzi un territorio contraddistinto da una notevole attrattività turistica anche i flussi di chi si sposta per motivi di piacere o svago non sono di minore rilevanza.

In generale, gli spostamenti si possono distinguere in sistematici ed occasionali. Mentre risulta immediato annoverare i pendolari tra i viaggiatori sistematici, di più difficile inquadramento sono i flussi turistici. Qualora questi siano limitati per quantità oppure concentrati in concomitanza di particolari eventi, possono essere considerati spostamenti occasionali. Tuttavia, nel caso in cui il numero di coloro che si spostano per piacere o svago cresca notevolmente, oppure diventi più equamente distribuito nel tempo, al di là di singoli eventi di rilievo o, addirittura, sino ad ottenere una destagionalizzazione dei flussi turistici, anche questo genere di spostamenti può essere assunto come sistematico.

Inoltre, è possibile inquadrare gli spostamenti in reti gerarchiche, ove tra i vari livelli la differenza consiste nell'importanza dei nodi e nella distanza fra gli stessi. Al giorno d'oggi per gli spostamenti di lunghissimo raggio (oltre i 1000 ~ 1500 km) l'aereo continua a ricoprire una *leadership* incontrastata. Tuttavia, in questo secolo si è visto scalzare il primato negli spostamenti a lungo raggio (500 ÷ 1000 km circa) tra nodi serviti dall'alta velocità ferroviaria. Negli spostamenti a medio raggio (100 ÷ 500 km circa) si ha una ripartizione tra l'uso del trasporto ferroviario e quello individuale dell'automobile. In questo caso la scelta modale viene spesso influenzata dai tempi di percorrenza e dalla frequenza delle corse ferroviarie, nonché dalla possibilità di potersi spostare in maniera capillare ed agevole con il trasporto pubblico locale (di vario genere) una volta giunti alla stazione servita dai treni a lunga percorrenza. Negli spostamenti a breve raggio (10 ÷ 100 km circa) e a brevissimo raggio (fino a circa 10 km) la scelta modale ancora una

volta si distribuisce tra uso del trasporto pubblico e del mezzo privato (anche mezzi a due ruote, come scooter e biciclette).

Per motivi ambientali, di salute pubblica e a causa di altri problemi legati alla congestione del traffico su strada, è fondamentale offrire al bacino di utenza delle zone ad alta densità abitativa un servizio di trasporto pubblico che garantisca emissioni limitate e non incida pesantemente sul livello di servizio fornito dalle infrastrutture, pertanto offra in maniera efficiente elevate capacità di trasporto.

Affinché tale servizio risulti efficace oltre che efficiente, è fondamentale che sia attrattivo, ossia contraddistinto da buone caratteristiche di tempi di percorrenza, frequenza del servizio e capillarità. In caso contrario il viaggiatore tenderà a preferire il mezzo privato, con le conseguenze negative già citate.

Dal momento che le zone di interesse sono fortemente urbanizzate risulta spesso molto difficile inserire nuove infrastrutture, a meno di non costruirle interamente in sotterranea, con costi notevolmente maggiori. Un ruolo fondamentale, utilizzando quanto già disponibile, possono ricoprirlo le ferrovie. Queste, negli ultimi tempi, soprattutto nel nostro Paese, sono viste sempre più come una valida alternativa all'automobile o all'aereo per spostamenti nazionali a medio o lungo raggio, anche grazie allo sviluppo dei collegamenti ad alta velocità lungo le principali direttrici nazionali. Tuttavia, la rete ferroviaria, con la possibilità di giungere sin nel centro delle grandi città evitando il traffico stradale, può conquistare una posizione di primo livello anche per gli spostamenti a corto raggio. Un esempio molto valido è la RER (*Réseau express régional d'Île-de-France*, ossia Rete Espressa Regionale), servizio ferroviario urbano e suburbano dell'area metropolitana di Parigi: esso conta cinque linee ferroviarie, di cui quattro passanti e una con attestazione nel centro della città, per un totale di 587 km e 249 stazioni, che collegano in maniera capillare i quartieri della capitale con l'hinterland parigino.

In Italia diverse città hanno sviluppato, seppur con estensioni inferiori, dei servizi analoghi: tra quelli di maggior interesse c'è il Servizio Ferroviario Metropolitano di Torino, che attualmente (a luglio 2019) conta 8 linee e 93 stazioni servite, ma per il quale sono previsti diversi progetti di potenziamento. L'area urbana di Torino è caratterizzata

da elevati flussi veicolari e talvolta colpita da fenomeni di congestione stradale soprattutto nelle ore di punta (da rilevare però come la percezione del traffico e dell'accettabilità dei tempi di percorrenza sia fortemente soggettiva, nonché diversa in base all'area di analisi, anche a causa di fenomeni di assuefazione da parte degli automobilisti), nonostante si stimi che meno della metà degli spostamenti (il 45,0%) avvenga con autovetture o motocicli, collocandosi così tra le migliori situazioni di distribuzione modale in Italia (tale quota vale, ad esempio, il 48,2% a Milano, il 65,5% a Roma e il 78,0% a Palermo). Tuttavia, si è ben al di sotto di altre grandi città europee: la percentuale del trasporto individuale scende al 41,1% per Madrid, al 39,2% per Berlino, al 33,1% per Londra e al 16,6% per Parigi (The European House - Ambrosetti & FS, 2017).

Al 1° gennaio 2018 la città di Torino ha registrato una popolazione residente di 882.523 unità, alla quale bisogna aggiungere una non trascurabile quota di studenti e lavoratori fuori sede, andando così a raggiungere all'incirca il milione di persone, alle quali vanno ulteriormente addizionati coloro che vivono nei Comuni della cintura⁽¹⁾. Attualmente è però presente una sola linea di metropolitana, mentre è in corso la progettazione della seconda linea, per il cui completamento si dovrà attendere almeno un decennio. Pertanto, già nel breve termine, un incremento dell'offerta dei servizi ferroviari urbani e suburbani, in affiancamento agli altri mezzi di trasporto pubblico locale, non può che favorire lo *shift* modale verso la mobilità pubblica.

Inquadrate all'interno della visione a reti gerarchiche, il Servizio Ferroviario Metropolitano assume un importante valore, poiché può fungere sia da insieme di collegamenti nella maglia degli spostamenti a brevissimo raggio (fino a circa 10 km) e a breve raggio (10 ÷ 100 km circa), sia da mezzo di spostamento all'interno del nodo di una rete a più vasta scala, ad esempio con il collegamento tra l'aeroporto di Torino-Caselle e la stazione di Torino Porta Susa, accesso alla rete ferroviaria AV/AC.

⁽¹⁾ Il contributo demografico degli altri Comuni appartenenti alla conurbazione di Torino è assai rilevante: considerando i centri di Beinasco, Collegno, Grugliasco, Moncalieri, Nichelino, Rivoli, San Mauro Torinese e Venaria Reale, si ottiene una popolazione di 311.691 residenti al 1° gennaio 2018. Per meglio comprendere il peso di tale bacino demografico basta confrontarsi con le città di Bari (323.370 residenti) e di Catania (311.620 residenti), rispettivamente nona e decima Città in Italia per numero di abitanti.

1.1 Finalità e obiettivi della Tesi

Nella presente Tesi ci si concentra sui collegamenti che operano tra la città di Torino e il comune di Alba, in provincia di Cuneo, rappresentati dalla linea 4 dell'SFM. Tale servizio ferroviario attualmente è offerto, nei giorni feriali, con un modello di esercizio a cadenzamento orario.

Al momento (luglio 2019) sono in corso i lavori propedeutici all'innesto della ferrovia Torino - Aeroporto - Ceres all'interno del passante ferroviario di Torino al fine di garantire il collegamento su rotaia dell'impianto aeroportuale di Caselle Torinese (TO), principale scalo della Regione Piemonte, con il capoluogo. Tuttavia, l'obiettivo più ambizioso è quello di collegare l'aeroporto con i territori a maggiore vocazione turistica attualmente integrati nel Servizio Ferroviario Metropolitano (completamento dei lavori propedeutici previsto nel 2022). Le linee chiamate in causa sono dunque la SFM 3 che serve molti comuni della Valle di Susa e, per l'appunto, la SFM 4, che arriva nel cuore del Roero e delle Langhe, toccando importanti centri come Bra ed Alba.

Nel dettaglio, si desidera offrire collegamenti ferroviari fra la città di Torino e l'aeroporto di Torino - Caselle che abbiano una cadenza di 15 minuti; ciò si esplicherebbe mediante modelli di esercizio con cadenzamento semi-orario per le due linee già citate, andando così ad alternare i due servizi passanti per la stazione di Caselle Torinese Aeroporto.

Per la linea SFM 3 viene già effettuato un servizio con convogli in partenza e in arrivo ogni mezz'ora, e non vi è necessità di pianificare interventi di potenziamento infrastrutturale, dal momento che linee utilizzate (rete del nodo di Torino e ferrovia Torino - Modane) sono in ogni tratto a doppio binario e, dunque, ritenute adeguate ad inserire le tracce orario richieste da tale cadenzamento. Per quanto concerne la linea SFM 4, invece, circa due terzi del percorso attualmente utilizzato sono a semplice binario.

La finalità della Tesi è valutare la fattibilità di un modello di esercizio con un treno ogni mezz'ora anche su quest'ultima linea e, in caso affermativo, delinearne le principali caratteristiche.

Parallelamente, essendo di pari interesse la creazione di collegamenti rapidi dedicati ai pendolari su tale direttrice, si è considerata anche la possibilità di inserire coppie di treni Regionali Veloci (con cadenzamento orario) che uniscano la stazione di Torino Porta Nuova a quella di Alba, via Carmagnola - Cavallermaggiore - Bra, sfruttando parte della linea a doppio binario per Fossano; tali coppie costituirebbero un raddoppio dell'offerta tra Torino e Cavallermaggiore, con una griglia di cadenzamento (in tale tratta) gemella a quella dei servizi operati per Cuneo / Savona e sfalsata rispetto ad essa di 30 minuti.

L'obiettivo della presente Tesi è dunque comprendere la fattibilità di tali modelli di esercizio ferroviario con l'attuale scenario infrastrutturale, e quali interventi di *upgrade* possano renderli fattibili (in caso di esito negativo) oppure portare conseguenze positive in termini di capacità e di stabilità e/o robustezza d'orario (in caso di esito già positivo); si tratta pertanto di un'analisi multi-scenario a più livelli: scenari operativi (modelli di esercizio) e scenari infrastrutturali.

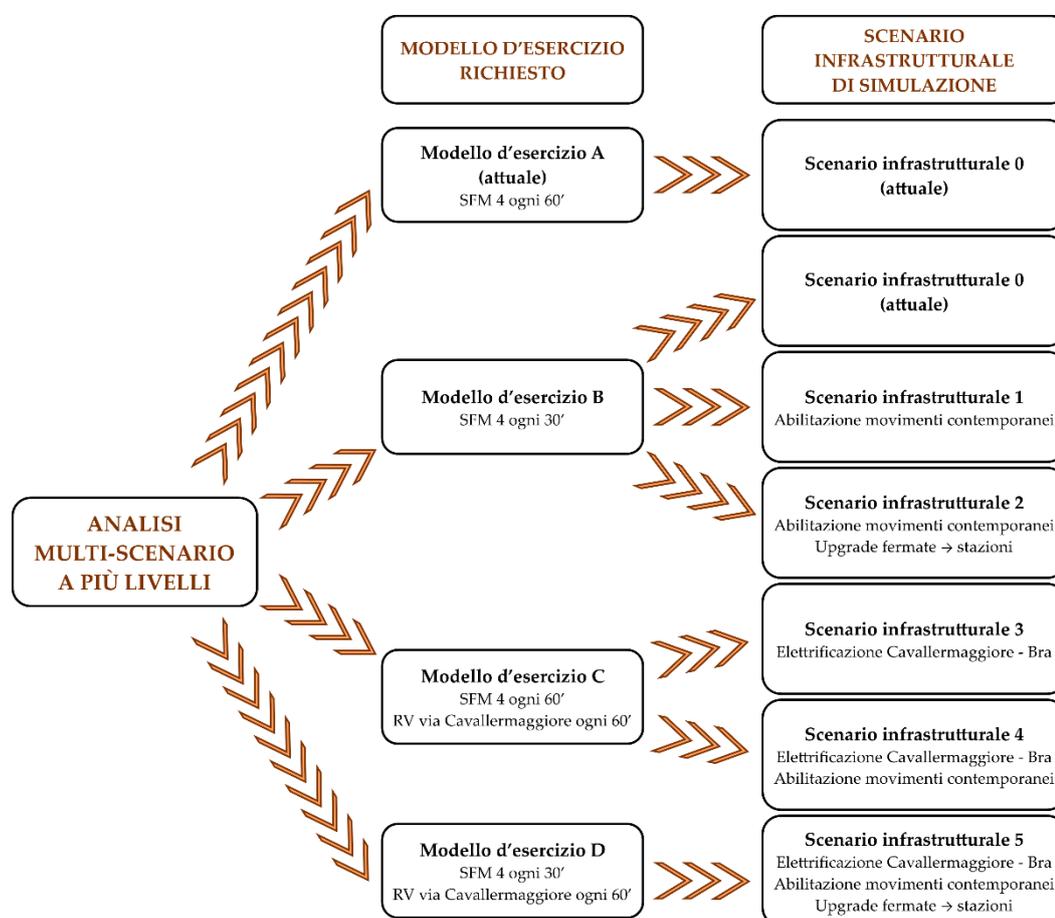


Figura 1.1 - Schema dell'analisi multi-scenario a più livelli elaborata nella Tesi

Lo schema di processo seguito nella Tesi per il raggiungimento degli obiettivi preposti si può riassumere nel *flow chart* presentato di seguito in *Figura 1.2*.

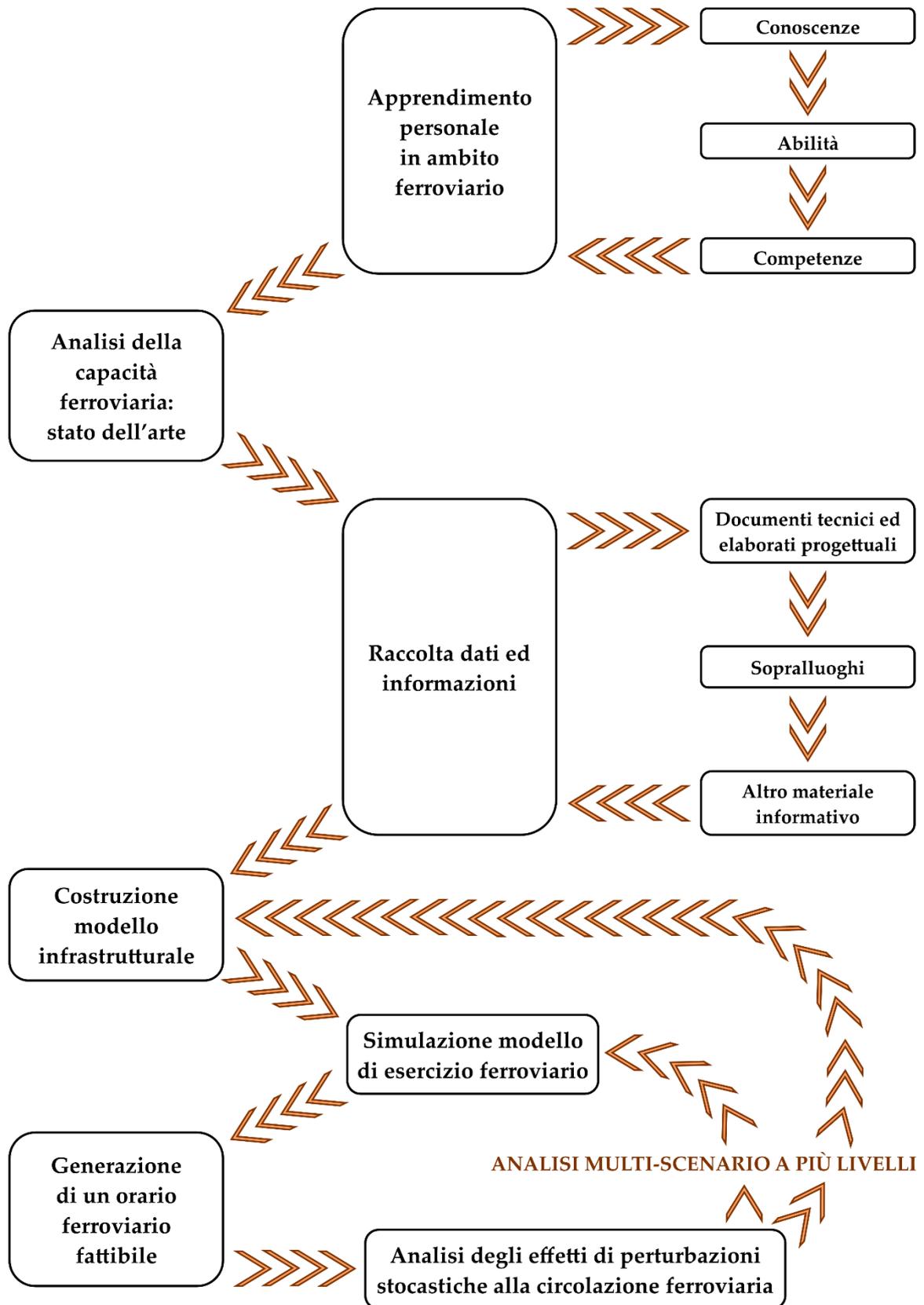


Figura 1.2 - Schema di processo seguito nella Tesi per il raggiungimento degli obiettivi preposti

1.2 Inquadramento geografico del territorio

Il territorio oggetto di studio ricade all'interno della Regione Piemonte, nel Nord-Ovest d'Italia, a cavallo fra la Città Metropolitana di Torino e la Provincia di Cuneo.



Figura 1.3 - Localizzazione del territorio di interesse

Lo studio si è concentrato sulle linee di interesse afferenti al nodo di Torino con esclusione del nodo stesso, in quanto per approfondire le relative capacità e gestione del traffico ferroviario sarebbe necessaria un'approfondita analisi che si concentri solo su

tale porzione di rete e veda le tratte afferenti come condizioni al contorno su cui eventualmente effettuare delle modifiche.

I Comuni all'interno dei quali sono presenti località di servizio⁽²⁾ con servizio passeggeri offerto tramite i treni oggetto di studio sono presentati nella tabella seguente, assieme alle popolazioni ivi residenti al 1° gennaio 2018 (dato ISTAT più recente disponibile).

Tabella 1.1 - Elenco dei Comuni serviti dai collegamenti ferroviari oggetto di studio

Comune	Popolazione residente al 01/01/2018	Località di servizio presenti
Trofarello (TO)	10.901	1
Villastellone (TO)	4.688	1
Carmagnola (TO)	28.976	1
Sommariva del Bosco (CN)	6.321	1
Sanfrè (CN)	3.021	1
Cavallermaggiore (CN)	5.455	2
Bra (CN)	29.645	2
Pocapaglia (CN)	3.319	1
Santa Vittoria d'Alba (CN)	2.831	1
Monticello d'Alba (CN)	2.341	1
Alba (CN)	31.498	2

Si può osservare come le località servite dalla tratta a sud del nodo di Torino siano perlopiù piccoli o medi centri urbani. Per alcuni di essi sono presenti più località di servizio, dal momento che sono servite anche alcune frazioni, oltre al principale agglomerato cittadino:

- Bandito, frazione di 2.164 abitanti, ricadente nel Comune di Bra (CN);

⁽²⁾ Si definiscono località di servizio i punti notevoli di una linea ferroviaria, che possono avere diverse caratteristiche e funzioni: tra queste si annoverano le stazioni (adibite al servizio passeggeri, normalmente utilizzate per regolare la circolazione dei treni e munite di impianti atti ad effettuare le precedenzae fra treni nello stesso senso e, sul semplice binario, gli incroci fra treni in senso opposto), le fermate (adibite al servizio passeggeri, di regola non intervengono nel distanziamento dei treni e non sono utilizzate per effettuare incroci, precedenzae e manovre), i posti di movimento (stazioni non adibite al servizio passeggeri), i posti di comunicazione (posti su linee a doppio binario, protetti da segnali di blocco, sprovvisti di segnali di partenza e d'impianti atti ad effettuare precedenzae, ma muniti di comunicazioni per il passaggio da un binario all'altro), i posti di blocco intermedi (posti di servizio, muniti di segnali fissi e adibiti al distanziamento dei treni).

- Madonna del Pilone, frazione di 169 abitanti, ricadente nel Comune di Cavallermaggiore (CN);
- Mussotto, frazione di 2.640 abitanti, ricadente nel Comune di Alba (CN).

Se si prendono in considerazione anche gli altri territori interessati dal servizio futuro pianificato per la SFM 4, il bacino di utenza dell'intera linea si arricchisce dei residenti riportati in *Tabella 1.2*. Si ipotizza di estendere il servizio con frequenza ogni 15 minuti (sovrapposizione di SFM3 e SFM 4) fino alla stazione di Ciriè, località in cui la linea ferroviaria per Ceres passa da doppio a semplice binario.

Tabella 1.2 - Elenco dei Comuni serviti dalla linea SFM 4 nel nodo di Torino e nel prolungamento verso Nord

Comune	Popolazione residente al 01/01/2018	Località di servizio presenti
Moncalieri (TO)	57.234	1
Torino (TO)	882.523	6
Venaria Reale (TO)	33.781	2
Borgaro Torinese (TO)	11.889	1
Caselle Torinese (TO)	13.935	2
San Maurizio Canavese (TO)	10.312	1
Ciriè (TO)	18.639	1

Di tale incremento dell'offerta di trasporto ne gioverebbero poli attrattori di grande rilievo, quali l'Aeroporto di Torino-Caselle e lo Juventus Stadium, rispettivamente serviti dalla stazione di Caselle Torinese-Aeroporto e da quella di Venaria-Stadio.

Per la città di Torino vengono considerate 6 località di servizio adibite a servizio passeggeri, comprendendo anche quelle di prossima realizzazione Torino Zappata, Torino Dora e Torino Grosseto, oltre alle già presenti Torino Lingotto, Torino Porta Susa e Torino Rebaudengo-Fossata.

Per quanto concerne la tratta strettamente oggetto dell'analisi, ossia da Trofarello ad Alba, si considera ora la morfologia del territorio attraversato. La tratta Trofarello - Cavallermaggiore, appartenente alla ferrovia Torino - Fossano - Savona, è essenzialmente in pianura, posta ad altitudini comprese tra i 231 m s.l.m. e i 288 m s.l.m., non presentando così livellette mai superiori a 5 per mille.

Medesimo discorso per la ferrovia Carmagnola - Bra, che vede altitudini comprese tra i 240 m s.l.m. e i 276 m s.l.m. e livellette sempre comprese entro il 6 per mille.

Considerando invece la tratta Cavallermaggiore - Bra - Alba, appartenente alla ferrovia Cavallermaggiore - Alessandria, il territorio attraversato risulta pianeggiante solo tra Cavallermaggiore e Bra, con altitudini comprese fra 276 m s.l.m. e 288 m s.l.m. e pendenze inferiori al 5 per mille; fra Bra e Alba viene attraversato il territorio collinare del Roero fino a giungere ai confini della Bassa Langa: in questo caso il percorso è più tortuoso, con altitudini comprese fra i 164 m s.l.m. e i 276 m s.l.m. e livellette fino all'11 per mille.

1.3 Struttura della Tesi

Per affrontare un problema complesso come quello della costruzione di modelli di esercizio ferroviario in un'analisi multi-scenario dal punto di vista infrastrutturale si è deciso di partire dall'approfondimento delle conoscenze presenti in letteratura per poi raccogliere ogni genere di informazione sulle linee di interesse. Ciò è servito per un corretto approccio con il simulatore di sistemi di trasporto ad impianto fisso SASTRE sviluppato e disponibile presso l'Area Trasporti del DIATI del Politecnico di Torino, il quale fornisce la possibilità di costruire orari ferroviari in maniera deterministica e valutare con delle simulazioni quel che accade inserendo delle perturbazioni stocastiche, tipiche dell'esercizio.

Nel dettaglio, dopo il presente primo capitolo introduttivo, all'interno del quale si è fornito un inquadramento geografico e morfologico delle linee oggetto di studio, viene approfondito nel secondo capitolo quanto è presente in letteratura riguardo l'esercizio ferroviario su linee a binario singolo, con le problematiche ad esso legate e i limiti di capacità.

Nel terzo capitolo si presentano i principali strumenti informatici utilizzati per la realizzazione del presente lavoro di Tesi: la piattaforma PIC Web di Rete Ferroviaria Italiana e il software SASTRE, rispettivamente usati per la raccolta di dati riguardanti

treni pianificati ed effettivamente circolati e per la simulazione ferroviaria dei nuovi orari realizzati.

Nel quarto capitolo si approfondisce la situazione circa l'offerta di trasporto e lo scenario infrastrutturale attuali, inquadrando l'intero Servizio Ferroviario Metropolitano di Torino e poi concentrandosi sulla relazione tra il capoluogo piemontese ed Alba; si mostra inoltre nel dettaglio l'analisi effettuata sul materiale rotabile utilizzato e le relative caratteristiche che influenzano l'esercizio.

Il quinto capitolo verte sullo studio statistico di tempi e ritardi, con periodo di riferimento l'intero mese di marzo 2018. Si sono analizzati i tempi di percorrenza minimi sperimentali delle corse commerciali fra ogni coppia di località di servizio, i ritardi dei treni oggetto di studio in uscita dal nodo di Torino o in partenza da Alba, e i tempi di fermata in ogni località di servizio, per capire se potessero essere assunti come deterministici o se fosse necessario considerarli come una variabile aleatoria.

Il sesto capitolo presenta i possibili potenziamenti dell'offerta di trasporto sulla relazione oggetto di studio: passaggio da un cadenzamento orario ad uno semi-orario per la linea SFM 4, inserimento di treni Regionali Veloci istradati via Cavallermaggiore intercalati alle attuali coppie per Cuneo / Savona, oppure adozione di entrambe queste soluzioni.

Nel settimo capitolo viene valutata la fattibilità delle soluzioni appena citate e gli interventi infrastrutturali che esse richiedono, anche eventualmente a soli fini di velocizzazione o miglioramento della stabilità e/o robustezza d'orario.

Nell'ottavo capitolo si presentano, in conclusione del lavoro svolto, le possibili scelte considerate come le migliori da adottare, tenendo conto delle mutevoli condizioni al contorno, presentate come sviluppi futuri, da considerarsi sia come approfondimenti, ma anche come progetti paralleli di miglioramento dell'offerta di trasporto regionale.

Le fotografie presenti nella Tesi sono state scattate dall'autore durante alcuni sopralluoghi effettuati presso l'infrastruttura per approfondire al meglio la conoscenza della stessa.

Capitolo 2

Analisi della capacità ferroviaria: stato dell'arte

Riguardo il calcolo della capacità delle linee ferroviarie nel tempo sono stati proposti numerosi metodi di approccio al problema, anche molto diversi fra loro. Una prima classificazione generale può essere la seguente (Kontaxi & Ricci, 2012):

- metodi sintetici;
- metodi analitici;
- metodi analogici.

I metodi sintetici utilizzano espressioni deterministiche, le quali dal punto di vista matematico sono equazioni aventi incognite fra loro indipendenti; i metodi analitici utilizzano espressioni probabilistiche, le quali dal punto di vista matematico sono equazioni con incognite dipendenti l'una dall'altra; i metodi analogici includono i metodi asincroni (di ottimizzazione di una o più variabili) e sincroni (di simulazione).

Un'altra classificazione molto comune li suddivide come segue (Abril, et al., 2008):

- metodi analitici;
- metodi di ottimizzazione;
- metodi di simulazione.

I metodi analitici sono piuttosto semplici, utili per ottenere una soluzione preliminare oppure come termine di confronto per modelli più complessi. Essi sono studiati per modellizzare il sistema ferroviario tramite l'uso di formule matematiche. Vengono tipicamente utilizzati per determinare la capacità teorica oppure per valutare la capacità pratica come percentuale della capacità teorica, tenendo eventualmente conto di tempi cuscinetto che favoriscano la stabilità d'orario. I metodi analitici possono essere utili nell'identificare colli di bottiglia e importanti vincoli della rete. Di contro, i risultati ottenuti possono essere pesantemente influenzati dalla scelta dei parametri di modellizzazione, nonché dal tipo di infrastruttura, dal materiale rotabile e dall'eterogeneità del traffico ferroviario.

I metodi di ottimizzazione sono progettati per risolvere in maniera strategica il problema della capacità ferroviaria e per offrire soluzioni migliori rispetto alle formule puramente analitiche. Tali metodi si basano sulla costruzione di orari ottimali,

eventualmente in condizioni di saturazione dell'infrastruttura. La condizione di ottimo è usualmente ottenuta utilizzando tecniche di programmazione, tra le quali si citano le formulazioni MILP (*Mixed Integer Linear Programming*, ossia Programmazione Lineare Misto-Intera). Tra i metodi di ottimizzazione vi è anche quello di saturazione, che permette di ottenere la capacità ferroviaria dell'intero sistema attraverso l'inserimento progressivo di tracce orario (partendo dall'assenza totale di treni oppure da un orario di base).

I metodi di simulazione sono basati sulla riproduzione informatizzata di una o più operazioni di un processo o di un sistema reale nel tempo. Essi offrono una rappresentazione dinamica che rispetti le regole definite per l'esecuzione delle operazioni stesse. Dal momento che può essere possibile inserire aleatorietà tipiche dell'esercizio ferroviario reale, questi metodi possono essere utilizzati, oltre che per verificare la fattibilità di un orario, anche per valutarne robustezza e stabilità. La simulazione ferroviaria viene a volte affiancata dagli altri modelli presentati, dando vita a quelli che potrebbero essere definiti "modelli ibridi".

Un concetto preliminare del calcolo della capacità di una linea ferroviaria è quello dell'occupazione dell'infrastruttura da parte di un treno, interpretabile come la misura del consumo di capacità da parte dello stesso.

All'interno della *fiche* 406 R, rilasciata nel 2013 dall'UIC (*Union internationale des chemins de fer*), viene illustrato il tempo di utilizzazione da parte di un convoglio di una singola sezione di blocco (ciascun elemento fondamentale in cui viene divisa una tratta ferroviaria esercita in regime di blocco).

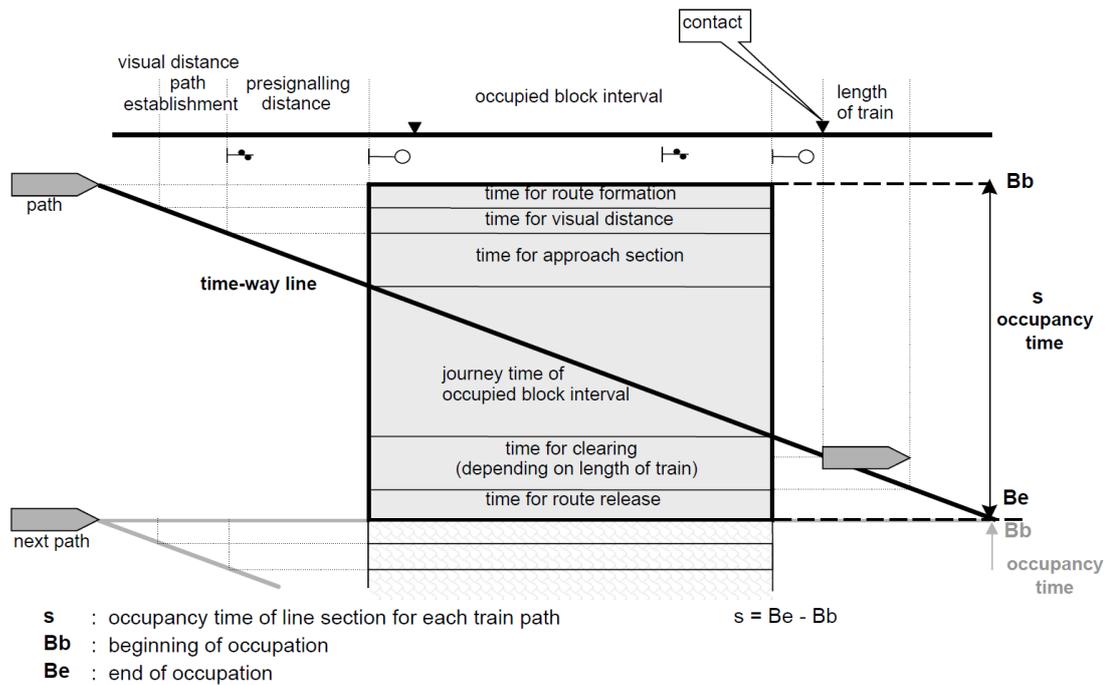


Figura 2.1 - Tempo di utilizzazione di una sezione di blocco

Dallo schema presentato in *Figura 2.1* si può comprendere come il tempo di utilizzazione di una sezione di blocco sia ben maggiore di quello di occupazione fisica della stessa da parte del convoglio. Va infatti aggiunto il tempo di percorrenza necessario per coprire la distanza tra il segnale di avviso e il segnale di protezione della sezione, nonché il tempo necessario affinché l'intero convoglio (e non solo la testa) sia transitato oltre la fine della sezione di blocco, considerando anche l'*overlap* (distanza di ricoprimento posta a valle del segnale di protezione della sezione successiva). Dal momento che, per motivi di fluidità della circolazione, si richiede che l'agente di condotta veda solo segnali verdi (via libera e avvisi di via libera) in piena linea, bisogna anche aggiungere il tempo legato alla distanza di visibilità dei segnali. Infine, vanno aggiunti i tempi tecnici per la formazione e la liberazione dell'itinerario, oggi di fatto trascurabili (pochi secondi) nel caso di attrezzaggio con blocco elettrico automatico o conta-assi.

Dal momento che nel presente lavoro di Tesi le maggiori criticità legate alla costruzione dei modelli di esercizio dipendono dalla presenza di linee a semplice binario, si sono approfondite le informazioni disponibili in letteratura a riguardo; sono stati presi inoltre in considerazione approfondimenti sui vantaggi dell'orario cadenzato

e sull'influenza di perturbazioni stocastiche alla circolazione ferroviaria, particolarmente rilevanti su ferrovie a singolo binario.

Grazie al suo basso impatto ambientale il trasporto su rotaia sta quest'oggi riacquisendo grande interesse, anche su linee secondarie per le quali negli ultimi tempi non sono stati effettuati grandi investimenti infrastrutturali. È di immediata comprensione come un aumento del traffico su una linea a semplice binario possa comportare difficoltà operative, e talvolta non si riesca a mantenere un adeguato livello di servizio. Goverde & Hansen (2013) hanno definito diversi criteri prestazionali per un modello di esercizio ferroviario:

- occupazione dell'infrastruttura: essa misura quanta parte della capacità infrastrutturale è consumata dalle tracce orario⁽³⁾ ed è dipendente dal numero di treni, dalla loro velocità media e dall'eterogeneità del traffico;
- fattibilità dell'orario: essa rappresenta la possibilità di seguire le tracce orario schedate da parte di tutti i treni presenti nel sistema; tali tracce devono inoltre avere percorsi privi di conflitti e per ogni treno non devono essere necessari rallentamenti o soste in linea a causa della presenza di altri convogli;
- stabilità dell'orario: essa indica la capacità di un orario di assorbire ritardi iniziali⁽⁴⁾ e primari⁽⁵⁾, in modo tale che un treno in ritardo possa ritornare a seguire la propria traccia orario schedata, e di evitare l'insorgenza di ritardi secondari⁽⁶⁾ senza che si vada a intervenire attivamente sulla circolazione dei treni (ad esempio con precedenza e/o con spostamento degli incroci). Per

⁽³⁾ Si tenga presente che non è conveniente, ai fini della stabilità d'orario, raggiungere un tasso di occupazione dell'infrastruttura pari al 100%: per linee ferroviarie suburbane dedicate al traffico passeggeri l'UIC propone un limite massimo dell'85% nella fascia di punta e del 70% considerando l'intera giornata.

⁽⁴⁾ Si definisce ritardo iniziale il ritardo che un treno possiede in entrata al sistema considerato: se ad esempio considerassimo l'intera rete ferroviaria nazionale, i ritardi iniziali sarebbero misurati per treni provenienti dall'estero alle stazioni di confine.

⁽⁵⁾ Si definisce ritardo primario un ritardo che può acquisire un treno per cause non dipendenti da altri treni, ad esempio per un prolungamento dei tempi di percorrenza o del tempo di fermata alle stazioni a causa di problemi tecnici al materiale rotabile.

⁽⁶⁾ Si definisce ritardo secondario un ritardo che può accumulare un treno per cause dipendenti dalla circolazione perturbata di altri treni.

- garantire la stabilità d'orario tipicamente si inseriscono allungamenti dei tempi di percorrenza e tempi cuscinetto fra le tracce;
- robustezza dell'orario: essa rappresenta la capacità di un orario di assorbire piccole perturbazioni stocastiche che si presentano in condizioni di esercizio ordinario, legate all'incarozzamento dei passeggeri, alla condotta di guida del macchinista, alla composizione dei convogli e alle condizioni metereologiche;
 - resilienza dell'orario: essa indica la flessibilità del modello di esercizio di prevenire o ridurre ritardi secondari intervenendo attivamente sulla circolazione dei treni, attraverso precedenzae (in stazione e dinamiche), spostamenti degli incroci e modifiche degli itinerari dei treni (ad esempio in presenza di linee affiancate), pertanto è fortemente influenzata dall'infrastruttura ferroviaria.

Viste le suddette definizioni si comprende come sui criteri prestazioni possa influire, anche in maniera rilevante, e in particolar modo nel caso di linee a semplice binario, la topologia dell'infrastruttura. Fondamentale sono il numero e la localizzazione delle località di servizio atte all'affiancamento dei treni (incroci e precedenzae).

Higgins et al. (1997) hanno sviluppato il primo modello di ottimizzazione per determinare la quantità e la posizione ideale dei punti di affiancamento; tuttavia non vengono presi in considerazione i costi dei lavori infrastrutturali necessari né se siano già presenti delle località in cui sia possibile l'incrocio.

Dal momento che i costi e le difficoltà tecniche legate a questo genere di interventi possono essere determinanti, Shih et al. (2014) hanno proposto un modello che integrasse al suo interno queste variabili nonché l'eventuale presenza di zone (ad esempio a causa dell'urbanizzazione) in cui fosse impossibile effettuare modifiche. Inoltre, in tale pubblicazione si sono confrontati i risultati ottimali ottenuti tramite il processo modellistico con quelli proposti da ferrovieri esperti che si basassero sulle proprie esperienze e conoscenze: si è dimostrato come l'impiego di un modello di ottimizzazione possa fornire risultati migliori a parità di risorse investite.

Nel caso in cui però l'infrastruttura non sia modificabile, dunque sia considerata come un vincolo e non come una variabile, è necessario realizzare un modello di esercizio che sfrutti al meglio la capacità della linea già esistente.

Zhou & Zhong (2007) hanno proposto una formulazione generalizzata della realizzazione di un orario, come un problema che debba rispettare dei vincoli, considerando come risorse limitate le linee e le stazioni. Viene inoltre presentata una soluzione *branch and bound*⁽⁷⁾ per ottenere orari che garantiscano fattibilità e stabilità.

Lindfeldt (2007) ha sviluppato un modello analitico semplificato, denominato SAMFOST, per calcolare il tempo necessario ad effettuare gli incroci su una linea a binario unico, tenendo conto della configurazione dell'infrastruttura, delle caratteristiche del materiale rotabile e dell'orario, nonché dell'eventuale ritardo dei treni. Tale modello è stato validato per mezzo del software di simulazione RailSys, che ne ha dimostrato l'accuratezza nel caso di traffico non congestionato. Il modello inoltre mostra esplicitamente gli effetti della puntualità, la quale risulta particolarmente importante su linee a semplice binario a causa della necessità di eseguire gli incroci. Vengono infine studiati i vantaggi che gli interventi di potenziamento infrastrutturale comportano sui modelli di esercizio, considerando sia il raddoppio integrale della linea, sia il raddoppio selettivo, sia l'aumento dei punti di incrocio.

Come già detto, un altro approccio che permette di studiare la fattibilità degli orari è quello basato sulla simulazione.

Coviello (2015) ha approfondito la possibilità di realizzare modelli di esercizio basati su una griglia cadenzata delle corse ferroviarie su una linea ferroviaria a binario unico (Savigliano - Saluzzo - Cuneo, in Piemonte): i vincoli da imporre all'esercizio aumentano e l'orario può essere di più difficile realizzazione. Nel modello di simulazione si osserva come il vincolo di maggior rilievo sia legato alla necessità di eseguire gli incroci in stazione, e come esso influisca sulla frequenza del servizio e sui tempi totali di viaggio. Sono stati individuati i possibili interventi infrastrutturali per rendere fattibile (o

⁽⁷⁾ Il *branch and bound* è una tecnica adottata nella risoluzione di problemi con spazio di soluzioni finito e consiste nella scomposizione del problema originale in sottoproblemi più semplici da risolvere. Gli algoritmi *branch and bound* testano tutte le soluzioni possibili fino a trovare quella corretta o quella ottima, eventualmente scartandone alcune per le quali dimostrano a priori la loro non ottimalità.

migliorarne stabilità e tempi di percorrenza) un cadenzamento semi-orario: tra questi si citano l'abilitazione delle stazioni di incrocio all'effettuazione dei movimenti contemporanei dei treni, la velocizzazione degli itinerari di ingresso e uscita dalla stazione (mediante sostituzione dei deviatori), l'aumento delle velocità di fiancata in piena linea e il miglioramento del sistema di segnalamento.

Il medesimo approccio è stato applicato da Coviello (2018) per la costruzione di modelli di esercizio basati su cadenzamento semi-orario per la ferrovia Canavesana (Settimo Torinese - Rivarolo Canavese - Pont Canavese), ove è in servizio la linea 1 del Servizio Ferroviario Metropolitano di Torino. In particolare, dal momento essendo la linea sprovvista di un sistema automatico di controllo del traffico, si è approfondita l'influenza che avesse l'attivazione del Sistema di Controllo della Marcia del Treno (SCMT) sull'esercizio. Sono stati poi studiati ulteriori scenari di potenziamento infrastrutturale, indicando per i modelli di esercizio costruiti per le varie soluzioni i rispettivi KPI (*Key Performance Index*).

Emery (2010), prendendo in considerazione le linee della rete ferroviaria svizzera a semplice binario a maggior traffico, mediante l'applicazione delle linee guida presentate nella *fiche* 406 R della UIC, ha testato la possibilità di inviare sino a 4 treni all'ora per direzione di marcia, sempre valutando la costruzione di orari cadenzati. È stato dimostrato come uno degli elementi di grande influenza in questo genere di problemi sia l'eterogeneità del traffico ferroviario, dal momento che l'eterotachicità delle tracce orario comporta un maggiore consumo di capacità e potrebbe presentare la necessità di eseguire delle precedenze, e come per rendere fattibili tali modelli di esercizio sia richiesta la realizzazione di ulteriori punti di affiancamento fra treni o di sezioni a doppio binario.

Grazie all'analisi microscopica che viene effettuata per mezzo degli strumenti di simulazione è possibile prendere in considerazione molti aspetti legati alla marcia del treno. Goverde et al. (2015) hanno inserito un ulteriore livello di affinamento dell'orario (in aggiunta a quello microscopico, per lo studio dettagliato e puntuale del singolo treno, e macroscopico, per l'ottimizzazione aggregata della rete) che tenga conto dell'efficienza energetica delle corse, un aspetto quasi sempre ritenuto secondario.

Il valore aggiunto della simulazione viene anche presentato da Lindfeldt (2012) con riferimento alle condizioni di traffico ferroviario congestionato: solo con una visione d'insieme del sistema è possibile comprendere e modellizzare ciò che realmente accade. Risulta fondamentale dunque considerare le dinamiche di gestione attiva del traffico ferroviario (tipicamente trascurate nei modelli analitici), applicate ad esempio in caso di traffico perturbato, e come esse influenzino la capacità dell'infrastruttura o la propagazione dei ritardi.

Qualora tale gestione dinamica non sia incorporata nella simulazione, possono presentarsi dei *deadlock* che interrompono la corretta esecuzione del programma. Sipilä (2015) ha presentato i tipici imprevisti che si possono presentare nella simulazione su una linea a semplice binario, riportati in *Figura 2.2*.

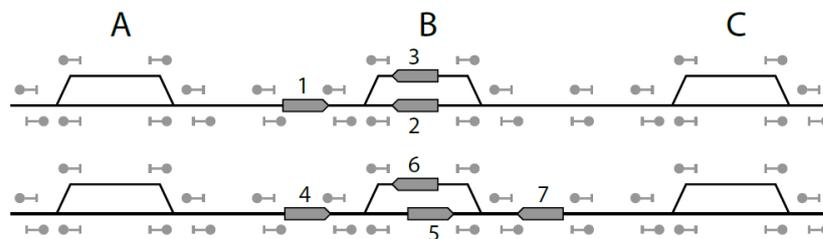


Figura 2.2 - Situazioni causa di deadlock su linee a semplice binario

Per rispecchiare quel che accade nella realtà, per evitare la prima situazione (treno 1 diretto da A a C, treni 2 e 3 diretti da C ad A) sarebbe stato necessario far attendere il treno 1 nella stazione A oppure non fare entrare nella stazione B uno fra i treni 2 e 3; per evitare la seconda situazione (treni 4 e 5 diretti da A a C, treni 6 e 7 diretti da C ad A) uno fra i treni 4 e 7 avrebbe dovuto attendere, rispettivamente, nella stazione A o C. Per realizzare una simulazione che sia attinente alla realtà viene proposto non solo di inserire queste logiche, ma anche di attribuire un grado di priorità ai vari treni (ad esempio in base alla propria categoria commerciale).

Le situazioni appena presentate possono ad esempio scaturire a causa di perturbazioni alla circolazione che comportano ritardi per più treni. Fondamentale risulta dunque inserire nelle simulazioni delle aleatorietà che rappresentino le caratteristiche reali dell'esercizio ferroviario. Medeossi et al. (2011) hanno proposto un metodo di calibrazione dei tempi di percorrenza basato sull'analisi dei dati raccolti a

bordo treno, su corse reali. Tale lavoro si è concentrato su una linea a doppio binario tra Venezia e Trieste, tuttavia può essere ritenuto un valido punto di partenza: vengono illustrate le variabilità insite nelle fasi di accelerazione, moto a regime, moto inerziale e frenatura.

Con la consultazione dei lavori di ricerca citati si osserva come un ruolo fondamentale nella capacità infrastrutturale sia ricoperto dal sistema di segnalamento. Attualmente, sulla rete ferroviaria nazionale e sulle linee di interesse regionale (ferrovie “ex-concesse”), la quasi totalità delle linee ferroviarie a binario unico esercite in regime di blocco sono dotate di blocco conta-assi eventualmente affiancato da un sistema di controllo, quali SSC (Sistema di Supporto alla Condotta) o SCMT (Sistema di Controllo della Marcia del Treno). Tuttavia, suscita interesse l’impiego del sistema ERTMS - ETCS (European Rail Traffic Management System - European Train Control System), citato in Lindfeldt (2007), Abril et al. (2008), Lindfeldt (2012), Coviello (2015), che nei livelli 2 e 3 (rispettivamente già utilizzato e ancora in fase di studio⁽⁸⁾) permette una comunicazione continua (e non puntuale) tra infrastruttura e treno.

Si ricordi, inoltre, che è necessario distinguere la capacità teorica di una linea dalla capacità effettiva (Goverde & Hansen, 2013): esse sono rispettivamente definite come il numero massimo di treni che può transitare in un dato intervallo di tempo con le migliori condizioni possibili (ideali) di orario e di materiale rotabile, e il numero massimo di treni sostenibili per la medesima linea una volta fissati i servizi desiderati e un determinato materiale rotabile atto ad espletarli.

Si tenga presente che nel caso di orari basati su griglie cadenzate (la cui costruzione è stata l’obiettivo di più lavori di ricerca sopra citati) il numero di treni da far transitare per ciascuna direzione in un dato intervallo di tempo è però un dato fissato a priori, e non necessariamente da massimizzare.

L’orario cadenzato integrato viene considerato uno dei più flessibili ed efficaci (Anselma, Dalla Chiara, Deflorio & Di Felice, 2007), ove per integrato si intende avente

⁽⁸⁾ In Italia, a partire dal mese di novembre 2017, sono stati eseguiti dei test da parte di Rete Ferroviaria Italiana per il nuovo sistema di segnalamento ERTMS livello 3 Regional fra Avezzano e Civitella Roveto (in Abruzzo), sulla linea Avezzano-Roccasecca, linea attualmente non elettrificata e a semplice binario.

la possibilità di ottimizzare nei nodi le coincidenze tra le linee automobilistiche e ferroviarie che vi confluiscono. Le caratteristiche che presenta un orario di questo genere sono ripetitività (tracce con partenze ad intervalli costanti e minuti fissi, separate da un dato periodo di cadenzamento, tipicamente fissato a 15, 30, 60 o 120 minuti) e simmetria (possibilità di costruire in maniera speculare la traccia del percorso di ritorno una volta stabilita quella del percorso di andata). L'obiettivo dei servizi aventi modelli di esercizio basati su questo genere di orari è fornire un servizio più o meno costante durante l'arco della giornata (eventualmente inserendo delle corse di rinforzo nelle ore di punta o eliminando qualche corsa nelle ore di minore frequentazione), scegliendo di realizzare un'offerta ordinata cui sia la domanda ad adeguarsi, piuttosto che cercare di assecondare la domanda stessa.

Capitolo 3

Metodo di studio

Dato l'obiettivo di valutare la capacità del sistema ferroviario di interesse, l'approccio utilizzato è stato di generare ed analizzare orari fattibili⁽⁹⁾. Si sono voluti investigare i possibili benefici per il servizio passeggeri, in questo caso cadenzato di tipo suburbano, causati da alcuni miglioramenti infrastrutturali. Si tenga presente che avere a che fare con orari cadenzati stabilisce il numero di treni circolanti per unità di tempo, pertanto quest'ultimo è da considerarsi un dato di *input* della valutazione e non può essere adottato per quantificare la capacità della linea.

La prima fase del lavoro è stata costituita dalla raccolta di dati ed informazioni utili al raggiungimento degli obiettivi fissati.

I dati relativi alle caratteristiche dell'infrastruttura sono stati raccolti a partire da documenti tecnici ed elaborati progettuali di RFI⁽¹⁰⁾, alcuni dei quali sono disponibili sul web mentre altri sono stati messi a disposizione in via confidenziale, nonché da alcune fra le Norme di Esercizio in vigore sulla rete RFI di rilevanza per le Imprese Ferroviarie⁽¹¹⁾ e dal Prospetto Informativo della Rete (PIR Web) di RFI.

I dati inerenti all'Orario programmato e al Circolato storico sono stati prelevati dalla Piattaforma Integrata Circolazione (PIC Web) di RFI, mentre i dati tecnici sul materiale rotabile sono stati individuati all'interno delle apposite schede tecniche.

⁽⁹⁾ Un orario si definisce fattibile quando rispetta vincoli tecnici (distanziamento minimo rispettato, nessun conflitto fra le tracce orario, rispetto dei tempi di percorrenza...) e operativi (coincidenze fra treni, tempi di sosta minimi e massimi...).

⁽¹⁰⁾ Sono stati utilizzati i Fascicoli di Linea n.8 e n.10; i Piani Schematici di Stazione di Trofarello, Carmagnola, Racconigi, Cavallermaggiore, Sommariva del Bosco, Bra, Santa Vittoria d'Alba ed Alba; i Profili piano-altimetrici di Linea delle linee Trofarello - Cuneo, Bra - Carmagnola e Castagnole delle Lanze - Cavallermaggiore; gli elaborati grafici dei progetti esecutivi di dettaglio di installazione dei nuovi impianti di segnalamento sulle tratte Trofarello - Carmagnola e Carmagnola - Racconigi.

⁽¹¹⁾ Per la corretta realizzazione dei modelli infrastrutturali e di esercizio sono state seguite le informazioni presenti nella Prefazione Generale all'Orario di Servizio in uso sulla Infrastruttura ferroviaria nazionale, nel Regolamento per la Circolazione dei Treni, nel Regolamento sui Segnali in uso sulla Infrastruttura ferroviaria nazionale e nell'Istruzione per il Servizio dei Deviatori.

Successivamente si è costruito il modello infrastrutturale sul software SASTRE, inserendo tutte le caratteristiche dell'infrastruttura ferroviaria, organizzando l'insieme di tutto il materiale rotabile a disposizione e creando l'orario pianificato per tutte le corse presenti nel sistema. Da queste ultime sono poi state rimosse quelle relative alla linea 4 del Servizio Ferroviario Metropolitano per poter costruire le nuove griglie di cadenzamento. Inoltre, negli scenari relativi all'inserimento dei nuovi treni Regionali Veloci Torino Porta Nuova - Alba via Cavallermaggiore, il cui scopo è anche quello di creare un servizio con cadenzamento semi-orario tra Cavallermaggiore e Torino (assieme ai RV per Cuneo o Savona/Ventimiglia), sono state rimosse un paio di coppie di rinforzo su Cuneo aventi come traccia orario esattamente quella in cui inserire i nuovi collegamenti. Nel caso in cui si vogliano mantenere anche tali collegamenti supplementari nelle ore di punta bisognerà procedere ad una compressione dell'orario grafico. Sono state ristrutturare, in tutti gli scenari, anche le griglie di cadenzamento del SFM B, sia per permettere ai passeggeri di effettuare coincidenza nella stazione di Bra con le corse della linea SFM 4, sia per rendere fattibile l'inserimento delle nuove corse RV nel tratto Cavallermaggiore - Bra.

Dopo aver creato i modelli di esercizio, verificandone l'effettiva fattibilità, si è passati da una pura costruzione deterministica dell'orario all'inserimento di perturbazioni stocastiche, quali ritardi all'origine delle corse o allungamento dei tempi di fermata in stazione. Tutte le perturbazioni sono state descritte come fenomeni aleatori i cui parametri sono stati derivati dalle analisi sui dati sperimentali prelevati dalle serie storiche del traffico circolate disponibili sulla piattaforma PIC Web: tali informazioni vengono raccolte e catalogate in maniera completamente automatizzata, basandosi sull'occupazione di determinati circuiti di binario. Tutti i dati raccolti hanno un arrotondamento al mezzo minuto, pertanto lo scarto massimo tra valore reale e valore registrato è di ± 15 secondi.

È stata dunque valutata la stabilità d'orario per ciascun modello di esercizio per i vari scenari infrastrutturali associabili, analizzando le possibilità circa il recupero del ritardo per le corse oggetto di studio e la propagazione del ritardo stesso su tutte le altre corse presenti nel sistema, sia quelle appartenenti alla medesima griglia di cadenzamento, sia

quelle relative ad altri servizi, considerate come vincoli durante la realizzazione dei modelli di esercizio.

3.1 Piattaforma Integrata Circolazione (PIC Web)

La Piattaforma Integrata Circolazione (spesso indicata come PIC o PIC Web) è una piattaforma realizzata e curata da Rete Ferroviaria Italiana, disponibile on-line in maniera non pubblica, dopo richiesta e concessione di credenziali d'accesso.

Essa è un archivio interattivo di informazioni di vario genere inerenti al traffico ferroviario sull'infrastruttura nazionale di competenza di RFI. È possibile effettuare il monitoraggio dei treni in tempo reale (non in continuo, ma dipendentemente dall'occupazione di determinati circuiti di binario), avendo anche informazioni su eventi anomali, interruzioni e rallentamenti che si presentano temporaneamente sulla rete. Di tali eventi ne viene realizzato anche uno storico, in modo tale che si possa risalire alle cause di eventuali ritardi avuti in momenti precedenti. Sempre riguardo a interruzioni e rallentamenti, sono disponibili tutti gli interventi manutentivi programmati.

Per quanto riguarda le corse, sono presenti tutte le informazioni circa le tracce orario pianificate, tenendo conto anche di eventuali Variazioni in Corso d'Orario⁽¹²⁾ e modifiche dovute a scioperi programmati. Analizzando invece i movimenti già effettuati, sono disponibili sia tutte le informazioni su quanto fosse stato programmato (Orario programmato), sia su come poi la circolazione sia realmente avvenuta (Circolato storico). Le informazioni circa queste corse possono essere osservate sia dal punto di vista, fisso, di una località di servizio sia da uno mobile, che segua un determinato treno.

Durante la redazione della presente Tesi tutti i dati inerenti alle corse pianificate, dunque all'orario programmato, sono stati prelevati a partire da documenti che fossero riferiti alle località di servizio, ossia i Moduli M53 e i Prospetti di stazione.

⁽¹²⁾ Si definisce Variazione in corso d'orario (VCO) alle tracce orario dei treni ogni modifica all'orario dei treni ordinari, in corso di validità dell'orario, con mantenimento del numero già assegnato alla corsa. Essa può consistere in una variazione dell'orario di partenza e/o di arrivo, in un prolungamento o limitazione del percorso originariamente programmato, in una limitazione del percorso originariamente programmato e proseguimento su altra linea (purché affiancata) o in una soppressione del percorso originariamente programmato ed impostazione su altra linea (purché affiancata).

All'interno dei primi sono riportati, per ciascun treno che effettui sosta o transito nella località di servizio considerata, numero della corsa, Impresa Ferroviaria di competenza, categoria commerciale, provenienza, destinazione, orario di arrivo e di partenza previsti, informazioni sull'itinerario di stazione (Punto Origine dell'itinerario, binario di stazionamento o transito, Punto Fine dell'itinerario) e sulla periodicità, nonché eventuali annotazioni aggiuntive.

Treno	Cat	Provenienza	Destinazione	Arr.	Par.	PO	Bin.	PF	Periodicità	Manovre - Legami - Servizi	Annotazioni
10206	REG	CUNEO	TORINO P.NUOVA	08:09	08:10	☒ 05	I	☒ 01	soppresso FES		
10226	REG	CUNEO	TORINO P.NUOVA	08:09	08:10	☒ 05	I	☒ 01	circola FES		
1737	REG	TORINO P.NUOVA	Albenga	08:20	08:21	☒ 02	II	☒ 04	circola FES dal 22/4 al 2/9/18		
4708	REG	FOSSANO	TORINO STURA	08:27	08:28	☒ 05	I	☒ 01	soppresso FES		
4759	REG	TORINO STURA	FOSSANO	08:28	08:29	☒ 02	II	☒ 04	soppresso FES		
49301	MRI	MODANE FX	Lesegno		08:39	☒ 02	II	☒ 04	circola Me dal 10/12/17 al 21/4, dal 29/4 all'1/8 e dal 29/8 all'8/12/18 soppresso il 27/12/17		
10208	REG	CUNEO	TORINO P.NUOVA	08:39	08:40	☒ 05	I	☒ 01	circola dal 10/12/17 al 28/7 e dal 27/8 all'8/12/18 soppresso FES		
10105	REG	TORINO P.NUOVA	VENTIMIGLIA	08:47	08:48	☒ 02	II	☒ 04	circola dal 10/12/17 al 21/4 e dal 3/9 all'8/12/18		
10107	REG	TORINO P.NUOVA	VENTIMIGLIA	08:47	08:48	☒ 02	II	☒ 04	circola dal 22/4 al 2/9/18		
4416	REG	Alba	TORINO STURA	08:53	08:54	☒ 03	III *	☒ 01	circola sempre Piazzamento: Bin.III dal 12/10/2017 al 11/1/2018, TG Bin.IV dal 11/2/2018 al 11/20/2018, TG Bin.III dal 11/21/2018 al 12/8/2018, TG		
38018	LIS	CUNEO	TORINO ORB.F.A.		09:02	☒ 05	I	☒ 01	circola Me		
						☒		☒	soppresso FES		

Figura 3.1 - Estratto del modello M53 della stazione di Carmagnola (del 07/03/2018)

Nei Prospetti di stazione invece sono riportati i treni effettivamente programmati per il giorno considerato: nell'analisi dei dati si è osservato che, sovente, in particolare per i treni merci, ci siano soppressioni di treni comunicate in anticipo dalle Imprese Ferroviarie al gestore dell'infrastruttura.

Per quanto riguarda le informazioni sull'effettiva circolazione dei treni, invece, si sono analizzati i dati dal punto di vista delle corse. Per ciascuna di esse è possibile visionare la tabella di marcia reale, con indicazione dei ritardi in arrivo/in partenza e dei binari realmente impegnati per ogni località di servizio. Quando non è presente alcun dato nelle colonne del ritardo il treno è transitato in orario, mentre un numero negativo sta ad indicare un anticipo. Ogni riga della tabella di marcia reale assume una

colorazione in base al ritardo sull'orario pianificato. Tutti i rilevamenti sono registrati con arrotondamento al mezzo minuto, dunque l'approssimazione massima è di 30 secondi. Tramite questo strumento è stato possibile ricavare i dati sperimentali per l'ottenimento dei minimi tempi di percorrenza fra due località e per la realizzazione delle statistiche sui ritardi in uscita dal nodo di Torino, ritardi in partenza da Alba e tempi di fermata alle stazioni e alle fermate.

Tabella di Marcia											
Numeri Utilizzati											
4406		4407		4408		07/03/2018		07/03/2018		07/03/2018	
Numero	Località	Binario A	Reale A	Rit A	Δ Rit A	Cause A	Binario P	Reale P	Rit P	Δ Rit P	Cause P
	TORINO PORTA SUSAS	V	06:35	1,0			V	06:37	2,0	1,0	
4407	TORINO LINGOTTO	IV	06:44	3,0	1,0		IV	06:45	3,0		
	DEV. ESTR. TO L. LATO MONCALIERI		-					06:45	1,5		
	BIVIO SANGONE			2,0				06:47	2,0	0,5	
	MONCALIERI	IV	06:48	2,0			IV	06:49	2,5	0,5	
	TROFARELLO	V	06:52	1,5			V	06:54	2,5	1,0	
	VILLASTELLONE	II	06:58	1,0			II	07:00	2,0	1,0	
	CARMAGNOLA	IV	07:04	0,5			IV	07:09	4,0	3,5	
	SOMMARIVA DEL BOSCO		07:16	4,0				07:18	5,0	1,0	
	SANFRE'		07:20	4,5				07:21	4,5		
	BANDITO		07:24	4,0				07:25	4,0		
4408	BRA	I	07:30	1,0			I	07:33	2,0	1,0	
	POCAPAGLIA		-					07:37	1,5		
	S.VITTORIA		07:40	2,0	0,5			07:41	2,0		
	MONTECELLO D'ALBA		07:45	2,0				07:46	2,0		
	MUSSOTTO		07:50	2,0				07:51	2,0		
	ALBA	I	07:52	-1,0				-			

Figura 3.2 - Estratto della tabella di marcia di effettiva circolazione di un treno del SFM 4 (del 07/03/2018)

3.2 Software SASTRE

Dopo aver completato la raccolta dei dati si è provveduto alla creazione dei modelli infrastrutturali su cui implementare le simulazioni degli orari ferroviari. L'ambiente di analisi è il pacchetto SASTRE (Simulazione ed Analisi di Sistemi di Trasporto su RotaiE), sviluppato presso l'Area Trasporti del DIATI del Politecnico di Torino.

Per quanto concerne la simulazione ferroviaria, un algoritmo ad eventi di tipo misto discreto-continuo utilizza i dati inseriti per simulare la circolazione secondo l'orario stabilito. La parte continua dell'algoritmo simula la marcia dei treni attraverso l'integrazione numerica dell'equazione fondamentale del moto tenendo conto delle caratteristiche di tracciato, oltre che delle condizioni di rango e del materiale rotabile impiegato, mentre la parte discreta simula il funzionamento del sistema di segnalamento, il cui stato dipende dalla posizione dei treni all'interno della rete. Lo stato

del sistema di segnalamento può a sua volta modificare, attraverso aspetti non permissivi dei segnali o indicazioni condizionali sulle velocità massime, il profilo di marcia delle corse.

Per quanto riguarda la generazione degli orari ferroviari, un classico problema nel campo della Ricerca Operativa, in tale *software* è implementato un modello MILP (*Mixed Integer Linear Programming*, ossia Programmazione Lineare Misto-Intera), che può essere inquadrato tra i modelli della classe TTP (*Train Timetabling Problem*).

Nella pratica, in primis è stata costruita la topologia, per ciascuno dei quattro scenari infrastrutturali da analizzare, inserendo i seguenti elementi:

- binari;
- località di servizio;
- livellette;
- limiti di velocità (in piena linea e sui deviatoi);
- gradi di frenatura;
- circuiti di binario;
- itinerari di stazione;
- passaggi a livello;
- sistema di segnalamento;
- sistema di controllo;
- sistema di alimentazione elettrica.

A tali caratteristiche infrastrutturali sono stati poi aggiunti vincoli funzionali in materia di velocità di ingresso in stazione in presenza di segnale di partenza disposto a via impedita (30 km/h per la presenza di SCMT) e di movimenti contemporanei dei treni. Nelle stazioni ove questi ultimi non sono permessi, è stato inserito un tempo di attesa al segnale di protezione della stazione per il secondo treno in arrivo pari a 60 secondi (*flank protection*). In tutte le stazioni è stato imposto, per ciascun treno che debba effettuarvi sosta, l'arrivo con segnale di partenza disposto a via impedita.



Figura 3.3 - SASTRE: ambiente di modellazione dell'infrastruttura

Successivamente è stato definito tutto il materiale rotabile che circola all'interno del sistema considerato, in modo tale che potesse essere correttamente associato a ciascuna corsa. In dettaglio, sono stati inseriti locomotori, carrozze passeggeri e carri merci, nonché le loro usuali composizioni. A ciascuna categoria commerciale è stata assegnata una o più (nel caso di differenti collegamenti serviti) composizioni.

Si è poi provveduto alla creazione dell'orario, a partire da quello reale. Sono state importate tutte le corse presenti nella porzione di rete ferroviaria considerata, utilizzando i dati raccolti. Le corse relative ai servizi oggetto di studio sono state assunte come inattive, per poter essere sostituite da nuove griglie di cadenzamento, mentre tutte le altre corse presenti sono state considerate come "vincolo" di occupazione dell'infrastruttura.

Nella fase di realizzazione delle nuove corse si è cercato di limitare, per quanto possibile, ogni tipo di modifica sulle corse vincolo; quando ciò si è rivelato indispensabile per la fattibilità delle nuove griglie, si sono apportati cambiamenti nell'ordine di pochi minuti.

In ciascuna località di servizio i treni si attestano o transitano ad un *timing point*, ossia un punto orario di rilevamento del treno; nelle stazioni vi è un *timing point* per ciascun binario. In questo modo è possibile identificare immediatamente il binario sul quale il

treno viene istradato; per ogni stazione, in fase di creazione delle nuove corse è possibile assegnare arbitrariamente un binario oppure lasciare la possibilità di scelta all' algoritmo di generazione degli orari tra i binari indicati (*routing*).

Tim. P. Idx	Course ID	Location ID	Tim. Point ID	Sch. ARR	Sch. DEP	Sim. ARR	Sim. DEP	Min Dw. Time (s)	Max Dw. Time (s)	Is Stop	R.T. All. 1 (%)	R.T. All. 2 (%)	P.P. ID	P.P. dir
0	TO-Cav-Alba_4	Alba	Alba...58853-1:1	07:58:02	07:59:02	07:58:02	07:59:02	60	60	True	107	100	TO-Cav-Alba	1
1	TO-Cav-Alba_4	Mussotto	Mussotto...61090:0:1	08:00:57	08:00:57	08:00:57	08:00:57	0	0	False	89	100	TO-Cav-Alba	1
2	TO-Cav-Alba_4	Monticello d'Alba	Monticello d'Alba...65350:0:1	08:03:57	08:03:57	08:03:57	08:03:57	0	0	False	100	100	TO-Cav-Alba	1
3	TO-Cav-Alba_4	Santa Vittoria d'Alba	Santa Vittoria d'Alba...69631:0:1	08:06:54	08:06:54	08:06:54	08:06:54	0	0	False	68	100	TO-Cav-Alba	1
4	TO-Cav-Alba_4	Pocapaglia	Pocapaglia...71560:0:1	08:08:43	08:08:43	08:08:43	08:08:43	0	0	False	90	100	TO-Cav-Alba	1
5	TO-Cav-Alba_4	Bra	Bra...76541-1:1	08:15:01	08:17:01	08:15:01	08:16:15	120	120	True	100	100	TO-Cav-Alba	1
6	TO-Cav-Alba_4	Madonna del Pilone	Madonna del Pilone...84360-2:1	08:21:05	08:21:05	08:21:05	08:21:05	0	0	False	113	100	TO-Cav-Alba	1
7	TO-Cav-Alba_4	Cavallermaggiore	Cavallermaggiore...31283-2:2	08:25:10	08:26:10	08:25:10	08:26:10	60	60	True	92	100	TO-Cav-Alba	1
8	TO-Cav-Alba_4	Racconigi	Racconigi...24466-0:2	08:29:57	08:29:57	08:29:57	08:29:57	0	0	False	125	100	TO-Cav-Alba	1
9	TO-Cav-Alba_4	Carmagnola	Carmagnola...15267:0:2	08:35:09	08:36:09	08:35:09	08:36:09	60	60	True	76	100	TO-Cav-Alba	1
10	TO-Cav-Alba_4	Villastellone	Villastellone...7099:0:2	08:41:01	08:41:01	08:41:01	08:41:01	0	0	False	77	100	TO-Cav-Alba	1
11	TO-Cav-Alba_4	Trofarello	Trofarello...26-2:2	08:44:54	08:44:54	08:44:54	08:44:54	0	0	False	100	100	TO-Cav-Alba	1
12	TO-Cav-Alba_4	da/per Torino	da/per Torino...3400-2:2	08:46:44	08:46:44	08:46:44	08:46:44	0	0	False	100	100	TO-Cav-Alba	1
0	TO-Cav-Alba_5	da/per Torino	da/per Torino...3400-3:1	08:06:00	08:06:00	08:06:00	08:06:00	0	0	False	100	100	TO-Cav-Alba	2
1	TO-Cav-Alba_5	Trofarello	Trofarello...289-3:1	08:07:18	08:07:18	08:07:18	08:07:18	0	0	False	75	100	TO-Cav-Alba	2
2	TO-Cav-Alba_5	Villastellone	Villastellone...7199-1:1	08:11:11	08:11:11	08:11:11	08:11:11	0	0	False	108	100	TO-Cav-Alba	2
3	TO-Cav-Alba_5	Carmagnola	Carmagnola...15861-1:1	08:15:16	08:16:16	08:15:16	08:16:16	60	60	True	88	100	TO-Cav-Alba	2
4	TO-Cav-Alba_5	Racconigi	Racconigi...24770-1:1	08:20:58	08:20:58	08:20:58	08:20:58	0	0	False	126	100	TO-Cav-Alba	2
5	TO-Cav-Alba_5	Cavallermaggiore	Cavallermaggiore...31675-3:1	08:25:05	08:26:05	08:25:05	08:26:05	60	60	True	100	100	TO-Cav-Alba	2
6	TO-Cav-Alba_5	Madonna del Pilone	Madonna del Pilone...84260-2:2	08:30:45	08:30:45	08:30:45	08:30:45	0	0	False	117	100	TO-Cav-Alba	2
7	TO-Cav-Alba_5	Bra	Bra...76292:0:2	08:35:51	08:37:51	08:35:51	08:36:58	120	120	True	64	100	TO-Cav-Alba	2
8	TO-Cav-Alba_5	Pocapaglia	Pocapaglia...71460:0:2	08:42:42	08:42:42	08:42:42	08:42:42	0	0	False	66	100	TO-Cav-Alba	2
9	TO-Cav-Alba_5	Santa Vittoria d'Alba	Santa Vittoria d'Alba...69318:0:2	08:44:25	08:44:25	08:44:25	08:44:25	0	0	False	87	100	TO-Cav-Alba	2
10	TO-Cav-Alba_5	Monticello d'Alba	Monticello d'Alba...65250:0:2	08:47:33	08:47:33	08:47:33	08:47:33	0	0	False	90	100	TO-Cav-Alba	2
11	TO-Cav-Alba_5	Mussotto	Mussotto...60990:0:2	08:50:33	08:50:33	08:50:33	08:50:33	0	0	False	207	100	TO-Cav-Alba	2
12	TO-Cav-Alba_5	Alba	Alba...58552:0:2	08:52:41	08:53:41	08:52:41	08:53:41	60	60	True	100	100	TO-Cav-Alba	2
0	TO-Cav-Alba_6	Alba	Alba...58853-1:1	08:58:02	08:59:02	08:58:02	08:59:02	60	60	True	107	100	TO-Cav-Alba	1
1	TO-Cav-Alba_6	Mussotto	Mussotto...61090:0:1	09:00:57	09:00:57	09:00:57	09:00:57	0	0	False	89	100	TO-Cav-Alba	1
2	TO-Cav-Alba_6	Monticello d'Alba	Monticello d'Alba...65350:0:1	09:03:57	09:03:57	09:03:57	09:03:57	0	0	False	100	100	TO-Cav-Alba	1
3	TO-Cav-Alba_6	Santa Vittoria d'Alba	Santa Vittoria d'Alba...69631:0:1	09:06:54	09:06:54	09:06:54	09:06:54	0	0	False	48	100	TO-Cav-Alba	1

Figura 3.4 - SASTRE: editor dell'orario

Per la creazione delle griglie di cadenzamento alla base di ciascun modello di esercizio studiato si sono dapprima realizzate delle corse prototipo: a partire da queste si sono create nuove tracce che coprissero le distanze tra due località consecutive in un numero intero di minuti, eventualmente integrando allungamenti per puntualità ove fosse consigliabile (ad esempio giungendo in una stazione di incrocio). I tempi di percorrenza sono così stati approssimati per eccesso, in modo tale che già l'orario pianificato rispecchi l'impossibilità, da parte del personale di condotta, di seguire sempre dei profili di marcia ideali, che sfruttino fino al limite massimo teorico le prestazioni dei convogli.

Grazie all'algoritmo di generazione delle griglie di cadenzamento è stato possibile creare gli orari per ciascun modello di esercizio nei vari scenari infrastrutturali assegnati, rispettando i requisiti di fattibilità tecnica (assenza di conflitti fra le tracce, rispetto dei tempi di percorrenza...) ed operativa (minimi e massimi tempi di sosta, corretta pianificazione delle coincidenze...). Tuttavia, tali modelli sono puramente deterministici.

Si sono introdotte, dunque, delle perturbazioni stocastiche, che rappresentassero le variabilità presenti nell'esercizio, sotto forma di ritardi all'origine della corsa (o eventualmente in entrata nel sistema) e di tempi di fermata variabili alle località di servizio ove fosse effettuato servizio passeggeri. Per ottenere dei risultati affidabili le simulazioni vengono effettuate in maniera ripetuta: dal momento che l'orario preso come riferimento è di un giorno infrasettimanale che non sia né un seguente festivo né un precedente festivo, si suppone che le simulazioni siano valide per i giorni di martedì, mercoledì e giovedì. Per ottenere un campione di ripetizioni valido si è deciso di lanciare 24 simulazioni per ciascun orario realizzato, come se si coprissero i giorni feriali centrali per un intervallo di tempo di otto settimane, ossia due mesi.

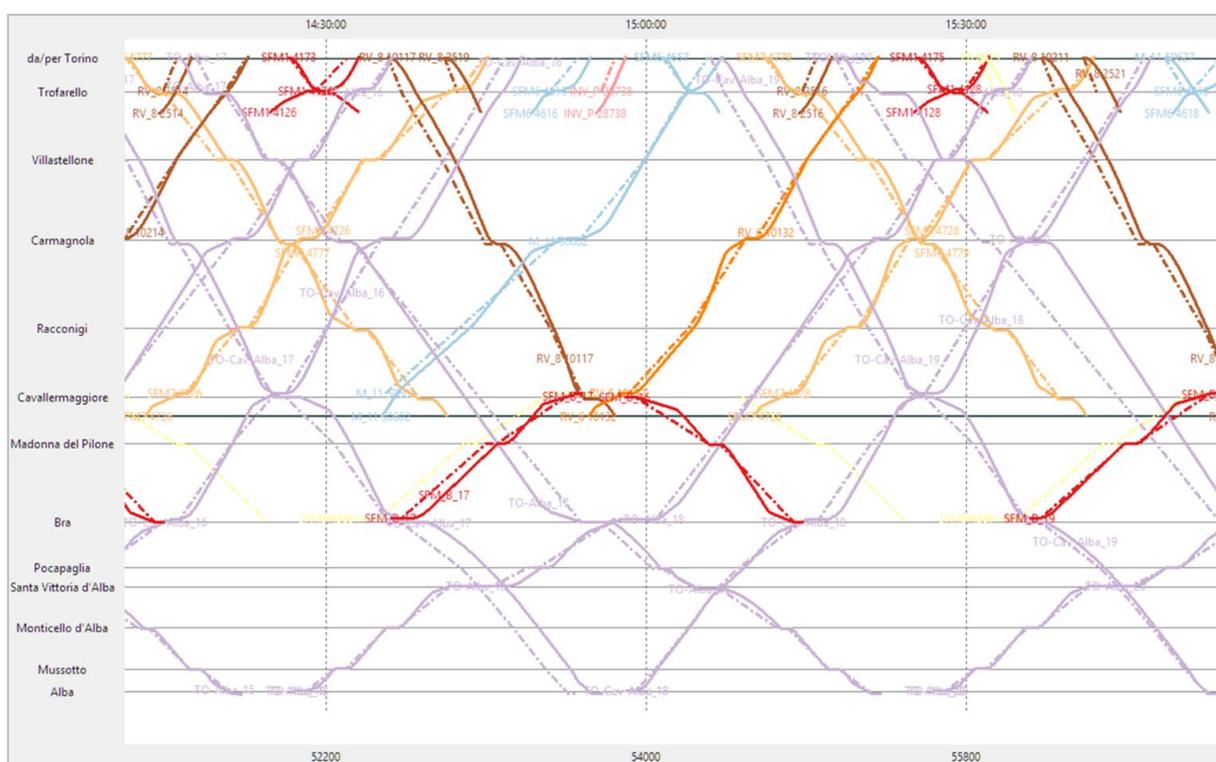


Figura 3.5 - SASTRE: estratto dell'orario grafico al termine di una simulazione

I risultati vengono espressi sia in forma grafica, come presentato in Figura 3.5 (le linee tratto-punto rappresentano le tracce orario schedulate, le linee continue quelle simulate), sia in forma tabellare (vengono registrati i ritardi all'arrivo e alla partenza per ciascuna corsa in ogni località di servizio toccata).

Capitolo 4

Offerta di trasporto e scenario infrastrutturale attuali

La linea SFM 4, oggetto di approfondimento del presente lavoro di Tesi, rientra nel Servizio Ferroviario Metropolitano di Torino, il quale a sua volta è componente fondamentale dell'offerta ferroviaria della Regione Piemonte. Questa si completa infatti con il Servizio Ferroviario Regionale, all'interno del quale si identificano due tipi di servizio:

- treni Regionali Veloci (RV), che collegano la città di Torino con altre grandi città del Piemonte e delle regioni italiane limitrofe;
- treni Regionali (R), che completano i collegamenti fra medi e piccoli centri urbani piemontesi e fra questi e i vicini territori della Liguria, della Lombardia e del Dipartimento francese delle Alpi Marittime (facente parte della Regione Provenza - Alpi - Costa Azzurra).

In *Figura 4.1* è possibile osservare un quadro d'insieme dell'offerta di trasporto attuale, che consta di 4 linee Regionali Veloci e 18 linee Regionali, per un totale di 173 stazioni servite. È allo studio, inoltre, la riattivazione del servizio passeggeri, con inserimento di treni Regionali, sulle linee Pinerolo - Torre Pellice, Asti - Alba, Asti - Casale Monferrato - Mortara, Novara - Varallo Sesia, che si aggiunge allo studio di fattibilità del progetto MetroGranda, realizzato dal Politecnico di Torino, che prevede il riutilizzo a scopo passeggeri delle linee Saluzzo - Cuneo e Cuneo - Mondovì (oggi sospese, ma ancora utilizzate dai treni merci) e la ricostruzione delle linee Bra - Bastia Mondovì (appartenente alla tratta Bra - Ceva, parte dell'originario percorso della ferrovia Torino - Savona) e Bastia Mondovì - Mondovì, chiuse rispettivamente nel 1994 e nel 1985.

A tale offerta commerciale si affiancano poi i treni turistici organizzati da Fondazione FS: si citano a titolo esemplificativo quelli che toccano varie località del sito del paesaggio vitivinicolo del Piemonte: Langhe, Roero e Monferrato, riconosciuto Patrimonio dell'Umanità dall'UNESCO nel 2014, e quelli che percorrono la ferrovia dell'Alta Val Tanaro (Ceva - Ormea), anch'essa attualmente sospesa al traffico regionale.

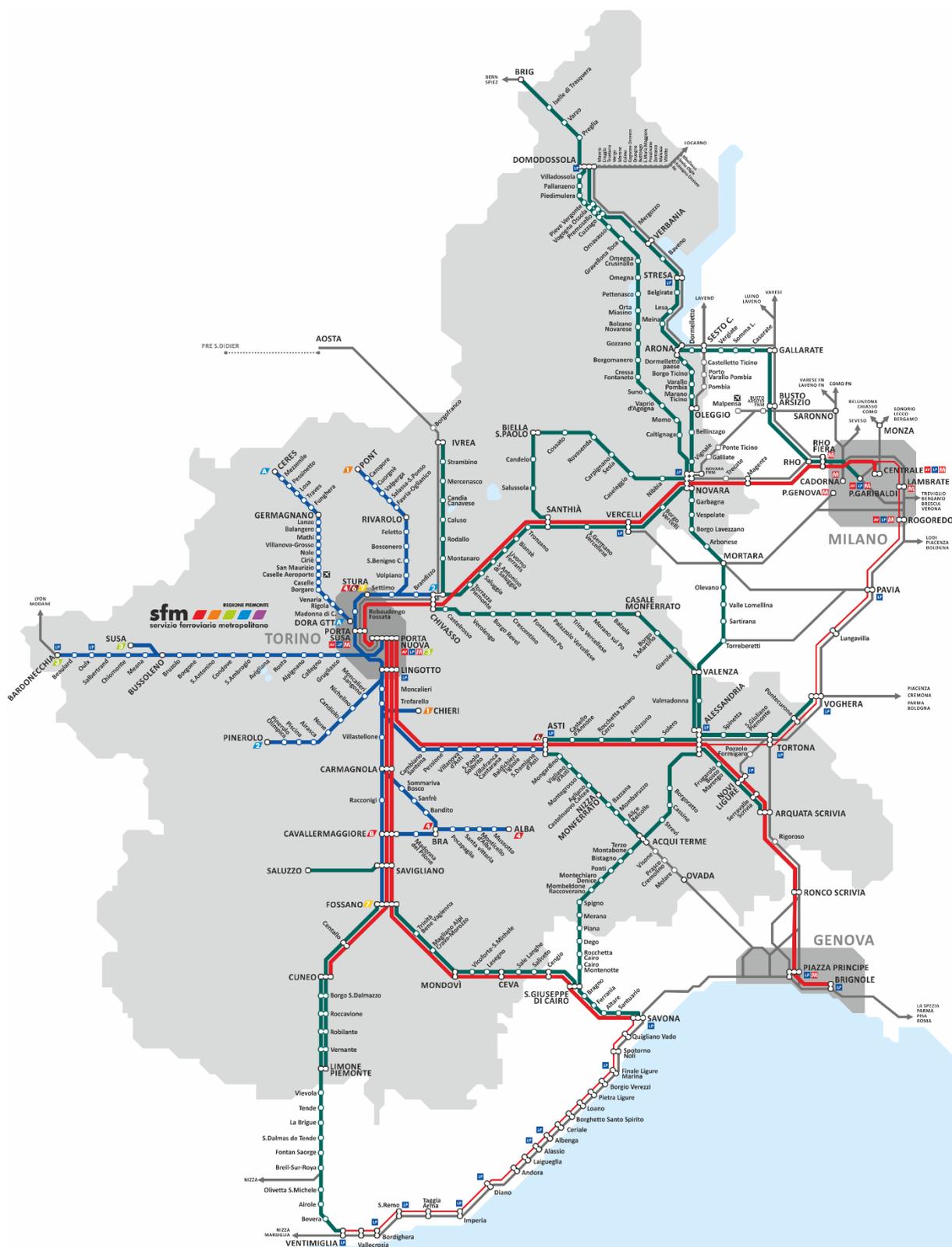


Figura 4.1 - Grafo del Servizio Ferroviario della Regione Piemonte

Una visione più approfondita merita invece il Servizio Ferroviario Metropolitano di Torino, i cui dettagli sono riportati di seguito.

4.1 Servizio Ferroviario Metropolitano di Torino

Il Servizio Ferroviario Metropolitano di Torino si propone sulla scena dell'offerta di trasporto come un sistema di collegamenti ferroviari urbani e suburbani che utilizza il passante ferroviario di Torino, inaugurato nel 2012. Tali treni collegano differenti quartieri della città con molti dei comuni dell'area metropolitana, fino a raggiungere centri distanti anche 90 km.

Attualmente (a luglio 2019) esso conta 8 linee per un totale di 93 stazioni servite.



Figura 4.2 - Grafo del Servizio Ferroviario Metropolitano di Torino (attuale)

Ai fini dell'elencazione delle infrastrutture impegnate dai convogli delle varie linee, quando essi percorrono il tratto di ferrovia passante, dotato di quattro binari, che va da Settimo Torinese fino a Trofarello si usa per comodità il termine "nodo di Torino": esso, in realtà, sta ad indicare tutta la rete ferroviaria racchiusa a nord dalla stazione di Settimo Torinese, ad ovest da quella di Alpignano e a sud da quella di Trofarello.

La linea SFM 1 collega Pont Canavese a Chieri. Per la tratta da Rivarolo Canavese a Chieri, sono offerte nei giorni feriali corse ogni 30 minuti nelle fasce di punta e ogni 60 minuti nel resto della giornata, mentre nei giorni festivi i collegamenti hanno cadenzamento bi-orario. Per la tratta da Pont Canavese a Rivarolo Canavese sono presenti solo quattro coppie giornaliere dal lunedì al venerdì. La linea è a trazione termica tra Pont Canavese e Rivarolo Canavese, mentre è elettrificata per tutto il resto della tratta. Pertanto, risulta attualmente obbligata la rottura di carico nella stazione di Rivarolo Canavese. La ferrovia Canavesana (così definita da Pont Canavese fino a Settimo Torinese) è interamente a semplice binario, successivamente i convogli impegnano il nodo di Torino, per poi proseguire sulla linea per Chieri, anch'essa a singolo binario.

La linea SFM 2 si estende da Chivasso a Pinerolo, nei giorni feriali con treni ogni 30 minuti nelle fasce di punta e ogni 60 minuti nel resto della giornata, mentre nei giorni festivi i collegamenti hanno cadenzamento bi-orario. La linea è interamente elettrificata, da Chivasso i treni percorrono la linea storica Milano - Torino, per poi inserirsi nel nodo di Torino e dunque proseguire sulla ferrovia per Pinerolo, una volta superata la stazione di Torino Lingotto. Il percorso è pertanto a semplice binario solo fra quest'ultima stazione e Pinerolo.

La linea SFM 3 collega la Valle di Susa a Torino con convogli ogni 30 minuti con origine (e in senso opposto destinazione) alternata fra Bardonecchia e Susa, nei giorni feriali, creando così due servizi con cadenzamento orario che percorrono buona parte del percorso in comune, effettuando però un numero differente di fermate. Così facendo si ottengono tempi di percorrenza competitivi sia per i pendolari dell'Alta Valle di Susa, sia della Bassa Valle di Susa. Nei giorni festivi i convogli sono offerti ogni 60 minuti, mediante due griglie di tracce orario con percorsi uguali ai giorni feriali, ma cadenzamento bi-orario. Attualmente i treni, dopo aver percorso la ferrovia Torino - Modane (interamente elettrificata e a doppio binario), proseguono per il quadrivio Zappata e da lì verso la stazione di Torino Porta Nuova. Tale collegamento è l'unico, all'interno del Servizio Ferroviario Metropolitano, che si attesta alla principale stazione della città; tuttavia, come già detto in precedenza, l'obiettivo è di prolungare tale linea

in direzione dell'aeroporto e, pertanto, in futuro verrà istradato via Torino Porta Susa (passante ferroviario).

La linea SFM 4 si estende dalla stazione di Torino Stura (via passante ferroviario) fino ad Alba; nei giorni feriali sono offerte corse ogni 60 minuti, con l'aggiunta di una coppia di rinforzo sulla relazione Torino Porta Nuova - Alba. Nei giorni festivi il cadenzamento è invece bi-orario, senza coppie di rinforzo.

La linea SFM 6 collega la stazione di Torino Stura (via passante ferroviario) ad Asti; nei giorni feriali viene offerto un servizio con cadenzamento orario, mentre nei giorni festivi il cadenzamento è bi-orario. I convogli percorrono il nodo di Torino e la ferrovia Torino - Genova; il percorso si sviluppa interamente su linea elettrificata e a doppio binario.

La linea SFM 7 si estende dalla stazione di Torino Stura (via passante ferroviario) fino a Fossano; nei giorni feriali viene offerto un servizio con cadenzamento orario, mentre nei giorni festivi il cadenzamento è bi-orario. I convogli percorrono il nodo di Torino e la ferrovia Torino - Savona; il percorso si sviluppa interamente su linea elettrificata e a doppio binario.

La linea SFM A attualmente collega le Valli di Lanzo alla città di Torino. Tale collegamento, che serve l'Aeroporto di Torino-Caselle, è attualmente attestato alla stazione di Torino Dora GTT per motivi infrastrutturali. Con l'inaugurazione del passante ferroviario, nel 2012, il piano del ferro delle linee provenienti da nord-est è stato portato a diversi metri sotto il livello del terreno, con il conseguente abbattimento della stazione storica di Torino Dora FS. Essa era la stazione di diramazione dalla linea per Milano della ferrovia Torino - Ceres. I lavori per l'inserimento di quest'ultima all'interno del passante ferroviario, che vedono come opera principale una deviazione del tratto terminale del percorso con interrimento sotto corso Grosseto sono ancora in corso. Al termine di tali lavori le stazioni di Torino Madonna di Campagna e Torino Dora GTT verranno dismesse e sostituite con quelle di Torino Grosseto e la nuova Torino Dora, entrambe interrate. Questa linea verrà pertanto trasformata in un prolungamento delle altre. Nei giorni feriali attualmente il servizio si compone per la maggior parte della giornata di corse ogni 30 minuti tra Germagnano e Torino (di cui solo quattro coppie prolungate su Ceres), e ogni 60 minuti a metà mattina e alla sera. Nei giorni festivi il

cadenzamento tra Germagnano e Torino è orario, sempre con quattro coppie prolungate su Ceres. La linea è interamente elettrificata, dotata di doppio binario tra le stazioni di Ciriè e Torino Dora GTT, mentre per la parte restante è a semplice binario.

La linea SFM B attualmente collega Cavallermaggiore a Bra, con cadenzamento orario nei giorni feriali e bi-orario nei giorni festivi. Tale linea è a trazione termica, essendo il tratto in questione non elettrificato (oltre che a binario semplice). Prima dell'elettrificazione della linea Bra - Alba (portata a termine a dicembre 2016) questo servizio veniva espletato tra Cavallermaggiore ed Alba con treni ad alimentazione diesel, mentre i treni elettrici della linea SFM 4 si attestavano a Bra. È allo studio la proposta di integrare questo servizio con i treni regionali Savigliano - Saluzzo, in modo tale da creare una nuova relazione diretta Bra - Cavallermaggiore - Savigliano - Saluzzo, che però necessita di un regresso nella stazione di Cavallermaggiore.

Attualmente i gestori dell'infrastruttura sono Gruppo Torinese Trasporti e Rete Ferroviaria Italiana: le competenze del primo ricadono sulla linea Torino - Ceres e sulla ferrovia Canavesana (Settimo Torinese - Rivarolo Canavese - Pont Canavese), mentre per tutte le altre tratte la proprietà è di RFI.

Per quanto concerne l'affidamento del servizio commerciale, invece, le linee SFM 1 e SFM A sono gestite da GTT, mentre tutte le linee restanti sono in mano a Trenitalia. Tuttavia, a maggio 2019, Trenitalia ha vinto la gara per l'affidamento dell'intero Servizio Ferroviario Metropolitano, bandita dall'Agenzia della Mobilità Piemontese, per la durata di dieci anni prorogabili per altri cinque.

Oltre al progetto di potenziamento e prolungamento del SFM 4, oggetto di studio della presente Tesi, sono al vaglio altri scenari di incremento dell'offerta di trasporto.

In primis l'attivazione della linea SFM 5, che collegherà Chivasso ad Orbassano. Verranno attivate le fermate di Torino San Paolo, Quaglia - Le Gru e Orbassano. Buona parte del tracciato ferroviario è già presente, poiché ad uso dei treni merci che giungono nello scalo merci di Torino-Orbassano, ma non lo sono le stazioni e le altre infrastrutture atte al servizio passeggeri.

Sono allo studio i prolungamenti delle linee SFM 6 e SFM 7 da Torino Stura a Chivasso, nonché della SFM 3 fino a Caselle Torinese Aeroporto o Ciriè.

È prevista inoltre l'attivazione di due nuove stazioni interrate, lungo il tracciato del passante ferroviario, Torino Dora (sita in via Andrea Costaguta, un po' più a sud della stazione storica, ormai demolita) e Torino Zappata (localizzata in corso Enrico De Nicola, non lontano dal quadrivio Zappata).

In *Figura 4.3* è possibile identificare questi interventi, già proposti nel 2016 dall'Agenzia della Mobilità Piemontese.



Figura 4.3 - Grafo del Servizio Ferroviario Metropolitano di Torino (possibile potenziamento futuro)

Secondo aggiornamenti di maggio 2019, si prevede inoltre, con la riattivazione della ferrovia Pinerolo - Torre Pellice, di prolungare alcune corse della linea SFM 2 a servizio dei comuni della Val Pellice.

Inoltre, data la necessità di rendere più frequenti i passaggi dei treni nel tratto urbano del nodo di Torino, si pensa di istituire anche una linea SFM 8 che vada, in una fase iniziale, da Settimo Torinese a Torino Lingotto, per poi studiarne possibili prolungamenti.

Si osserva come acquisisca sempre maggiore importanza il ruolo del Servizio Ferroviario Metropolitano anche all'interno della stessa città di Torino, per permettere spostamenti veloci tra quartieri molto lontani, con un percorso differente da quelli sia della linea 1 della Metropolitana, sia della futura linea 2. Inoltre, è allo studio la possibilità di permettere l'accesso a tale servizio ferroviario all'interno della fascia urbana ai possessori dell'abbonamento ai mezzi di trasporto di superficie, fornendo così, nello scenario futuro, un'offerta di trasporto assimilabile ad un'ulteriore linea di metropolitana.

4.2 Linea SFM 4 e modello di esercizio A (attuale)

L'attenzione volge ora alla linea 4 del Servizio Ferroviario Metropolitano. Questo servizio è attualmente offerto, nei giorni feriali, da 15 corse pari che vanno da Torino Stura ad Alba e altrettante corse dispari in senso opposto, il tutto con cadenzamento orario; le partenze da Torino Stura coprono l'intervallo 05:27-19:27, mentre quelle da Alba vanno dalle 06:07 alle 20:07. A queste si aggiungono una corsa serale in direzione sud da Torino Stura a Bra e una corsa al mattino presto in direzione nord da Bra a Torino Porta Nuova. C'è poi una coppia di rinforzo, al servizio dei pendolari, che effettua la relazione Torino Porta Nuova - Alba e viceversa (in direzione di Torino al mattino e in direzione opposta al tardo pomeriggio).

L'insieme di queste corse viene indicato come **modello di esercizio A**.

Ai fini della simulazione è stato scelto di selezionare le corse riferite al mese di marzo 2018, dal momento che dal mese di agosto 2018 ai treni della linea SFM 1 è stato imposto dall'Agenzia Nazionale per la Sicurezza Ferroviaria di utilizzare la ferrovia Canavesana con velocità limitata a 50 km/h a causa dell'assenza di sistemi di controllo della

circolazione dei treni⁽¹³⁾. Questa scelta ha comportato perturbazioni sulle altre linee del Servizio Ferroviario Metropolitano, con conseguenti piccole modifiche all'orario. Ciò non è un problema, dal momento che da allora sino ad oggi il numero di corse offerte è rimasto invariato; pertanto, ai fini dell'offerta commerciale, si possono considerare come valore di confronto con gli scenari di potenziamento i collegamenti disponibili a luglio 2019.

Le coppie di treni Torino Stura - Alba attualmente effettuano le seguenti fermate intermedie:

- Torino Rebaudengo - Fossata;
- Torino Porta Susa;
- Torino Lingotto;
- Moncalieri;
- Trofarello;
- Villastellone;
- Carmagnola;
- Sommariva del Bosco;
- Sanfrè;
- Bandito;
- Bra;
- Santa Vittoria d'Alba;
- Monticello d'Alba;
- Mussotto.

Risulta pertanto attualmente non servita la fermata di Pocapaglia: a marzo 2018 essa era servita dai treni della coppia di rinforzo Torino Porta Nuova - Alba (che non

⁽¹³⁾ Tutti i provvedimenti urgenti in materia di sicurezza dell'esercizio ferroviario sulle reti regionali di cui al decreto 5 agosto 2016 del Ministro delle Infrastrutture e dei Trasporti sono stati presentati dalla Circolare n.9956 del 26 settembre 2016, emanata da ANSF. Da queste direttive sono state interessate le reti ferroviarie regionali interconnesse alla rete nazionale, non dotate di sistemi di controllo automatico della marcia del treno (tra cui la ferrovia Canavesana di competenza di GTT). Tra i comportamenti da osservare più influenti dal punto di vista dell'esercizio ferroviario, oltre al rispetto del limite di velocità di 50 km/h, vi è l'arresto del treno presso i passaggi a livello non dotati di barriere.

effettuavano alcuna altra fermata tra Bra ed Alba), ma a luglio 2019 tale fermata risulta spostata a Santa Vittoria d'Alba (sempre unica fermata tra Bra ed Alba).

Inoltre, la corsa al primo mattino che collega Bra a Torino Porta Nuova non effettua le fermate di Bandito e Sanfrè.

Per i tempi di percorrenza si considerano i valori al mese di marzo 2018, ossia prima delle modifiche indotte dall'imposizione dei limiti di velocità da ANSF. In un futuro prossimo tali perturbazioni all'esercizio saranno rimosse, dal momento che sono in corso i lavori di attrezzaggio della ferrovia Canavesana con il Sistema di Controllo della Marcia del Treno. Ciò detto, si riportano i tempi di percorrenza più importanti per lo scenario attuale, da considerare come riferimento, ossia quelli fra le principali stazioni torinesi e i maggiori centri toccati dal SFM 4:

- Torino Porta Susa - Bra: 54 minuti;
- Torino Porta Susa - Alba: 1 ora e 18 minuti;
- Torino Porta Nuova - Bra: 55 minuti;
- Torino Porta Nuova - Alba: 1 ora e 23 minuti;
- Bra - Torino Porta Susa: 53 minuti;
- Bra - Torino Porta Nuova: 56 minuti;
- Alba - Torino Porta Susa: 1 ora e 17 minuti;
- Alba - Torino Porta Nuova: 1 ora e 20 minuti.

Tali durate sono quelle pianificate, da intendersi da partenza (dalla prima stazione) ad arrivo (nella seconda stazione), ottenute da tracce orario commerciali, che contemplano al loro interno due contributi di aumento del tempo di viaggio rispetto al valore assunto come minimo tecnicamente realizzabile, considerate le prestazioni di quei convogli su quella linea: allungamento per puntualità e allungamento per lavori. A titolo esemplificativo, la somma di questi due incide come incremento nell'ordine di 5 minuti su un'intera traccia orario da Torino ad Alba.

Essendo presenti delle coppie di rinforzo nelle ore di punta, il modello di esercizio non è basato su una griglia di cadenzamento rigorosa: per alcuni treni è stato necessario aggiungere da due a quattro minuti di sosta nelle stazioni in cui è necessario effettuare incroci aggiuntivi, cosa che non accade nelle altre fasce del giorno (tipicamente a Sommariva del Bosco e/o a Santa Vittoria d'Alba).

4.3 Scenario infrastrutturale 0 (attuale)

Dal momento che uno scopo del lavoro di Tesi è effettuare un'analisi multi-scenario, prima di presentare le possibilità di *upgrade* infrastrutturale è bene illustrare approfonditamente lo scenario infrastrutturale attuale, da questo punto in poi indicato come **scenario infrastrutturale 0**.

La simulazione si concentra sul tratto compreso tra le stazioni di Trofarello ed Alba, dunque a valle del nodo di Torino; tuttavia, è necessario dare delle informazioni anche sul percorso interno a questo.

I treni del SFM 4, una volta partiti dalla stazione di Torino Stura, percorrono i binari della linea lenta del passante ferroviario (dedicati al Servizio Ferroviario Metropolitano, così definiti per distinguersi da quelli dell'affiancata linea veloce, utilizza dai treni a lunga percorrenza e dai treni Regionali e Regionali Veloci diretti verso Chivasso e destinazioni successive). Una volta superata la stazione di Torino Porta Susa, viene utilizzata la galleria passante, per poi arrivare alla stazione di Torino Lingotto. Da qui i quattro binari proseguono come due linee a doppio binario (denominate "linea Genova" e "linea Savona") affiancate ed i treni del SFM 4 proseguono con istradamento su linea Savona.

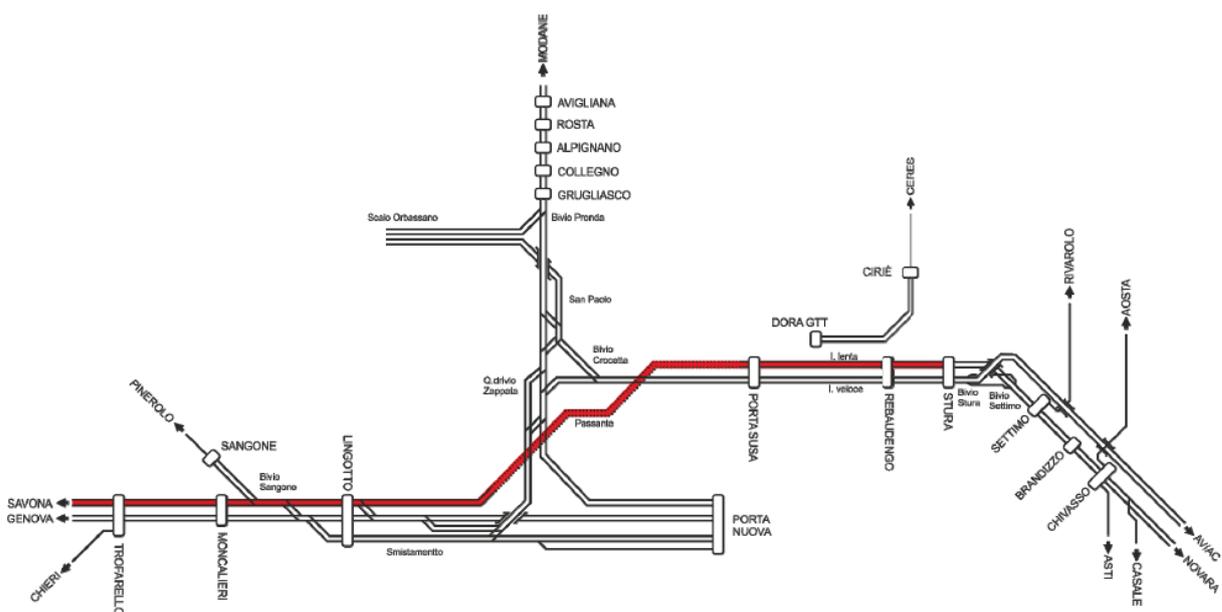


Figura 4.4 - Impegno del nodo di Torino da parte del SFM 4

Sino a Trofarello la linea è banalizzata e dotata di Blocco elettrico Automatico a Correnti Codificate (con codifica a 4 codici), con velocità di fiancata comprese tra i 120 km/h e i 160 km/h (dipendentemente dalla posizione e dal rango del materiale rotabile).

Lasciata la stazione di Trofarello il percorso prosegue fino a Carmagnola sulla ferrovia Torino - Fossano: essa è interamente a doppio binario, dotata di Blocco Elettrico Manuale tra Trofarello e Racconigi e di Blocco Conta Assi da Racconigi in poi. Tuttavia, sono in corso i lavori di installazione del Blocco elettrico Automatico a Correnti Fisse con emulazione di Ripetizione dei Segnali in Cabina tra Trofarello e Carmagnola, e del Blocco Conta Assi con Posti di Blocco Intermedi tra Carmagnola e Racconigi. In *Figura 4.5* è possibile vedere il nuovo impianto di segnalamento in via di installazione: si osservi la presenza del segnale a vela quadrata posto alla destra del futuro binario di destra, non più definibile binario illegale grazie alla possibilità di banalizzare⁽¹⁴⁾ il traffico ferroviario. Sui nuovi segnali non ancora in servizio sono applicate delle croci di Sant'Andrea di colore bianco come da normativa vigente⁽¹⁵⁾. Si è scelto pertanto di inserire all'interno del modello infrastrutturale creato sul software SASTRE il sistema di segnalamento che sarà funzionante al termine di tali lavori, previsto per il mese di ottobre 2019. Le velocità di fiancata sono comprese tra i 140 km/h e i 150 km/h.

⁽¹⁴⁾ Si definiscono linee banalizzate quelle linee a doppio binario che siano specialmente attrezzate per l'uso promiscuo di ciascun binario nei due sensi. A differenza delle linee non banalizzate, in cui i binari vengono definiti legale o illegale in base alla presenza o meno dei segnali, in questi casi si parla di binario di sinistra e binario di destra. Per la tratta oggetto di studio lo scopo dell'installazione del nuovo sistema di segnalamento non è l'utilizzo programmato dei due binari in maniera unidirezionale (quel che accade, ad esempio, con le precedenza dinamiche), ma la gestione della capacità residua per indisponibilità di un binario, per guasto, lavori o per un treno che vi sia fermato.

⁽¹⁵⁾ Il Regolamento sui Segnali in uso sull'infrastruttura ferroviaria nazionale prescrive di applicare una croce di Sant'Andrea di colore bianco su un segnale fisso per indicare al personale di macchina che il segnale stesso non è in servizio: in caso contrario si interpreterebbe il segnale come spento causa guasto e dunque, come segnalazione di via impedita.

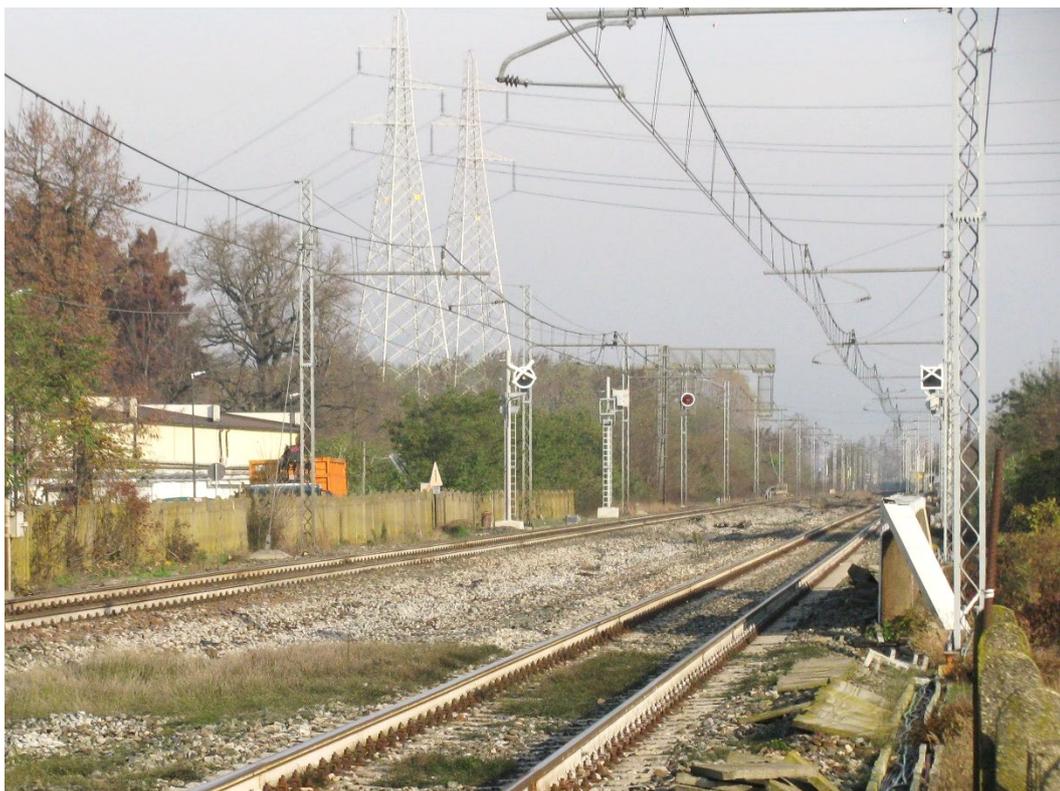


Figura 4.5 - Lavori di installazione del nuovo sistema di segnalamento nei pressi di Villastellone a ottobre 2018

Successivamente viene percorsa la ferrovia Carmagnola - Bra, linea elettrificata e a semplice binario facente parte dell'originaria ferrovia Torino - Savona via Bra - Ceva. Su questo tratto di 20,4 km sono presenti tre località di servizio intermedie: Sommariva del Bosco, Sanfrè e Bandito. La possibilità di effettuare incroci in stazione è possibile, oltre che nelle stazioni di Carmagnola e Bra (entrambe rispettano i requisiti per permettere i movimenti contemporanei, presenti sulle norme vigenti⁽¹⁶⁾), nella stazione di Sommariva del Bosco, mostrata in *Figura 4.6*, dotata attualmente di 2 binari (un terzo binario passante ancora visibile

⁽¹⁶⁾ L'arrivo, partenza o transito di un treno contemporaneamente all'arrivo, partenza o transito di un altro treno sono ammessi quando i treni percorrono itinerari di per sé stessi indipendenti per disposizione di impianto o l'esistenza di collegamenti di sicurezza garantisce, con la disposizione a via libera dei segnali o nei casi previsti nelle apposite Istruzioni, la completa indipendenza degli itinerari. Inoltre, è ammesso l'arrivo di un treno contemporaneamente all'arrivo, partenza o transito di un altro treno, pur essendo convergenti gli itinerari relativi, quando siano soddisfatte tutte le condizioni di sicurezza seguenti: il punto di convergenza (traversa limite dello scambio o dell'attraversamento) sia protetto da segnale di partenza a via impedita, preceduto da avviso, distinto per binario ed ubicato a distanza di almeno 100 metri dal punto stesso, salvo casi di distanze inferiori col minimo di 50 metri, accettabili in presenza di tronchino d'indipendenza; sia presente un sistema di controllo automatico della marcia del treno, come SCMT; nel tratto di arrivo compreso fra il segnale di 1^a categoria di protezione e quello di partenza a via impedita, la pendenza media del binario non sia superiore al 6 per mille in discesa; la stazione sia dotata di sottopassaggi affinché sia escluso l'attraversamento dei binari da parte degli utenti.

è stato dismesso), ma non di sottopassaggi, pertanto non idonea ai movimenti in contemporanea dei treni. La ex-stazione di Sanfrè, oggi declassata a fermata, mostrata in *Figura 4.7*, attualmente non permette l'incrocio dei treni, poiché il secondo binario è stato dismesso. La fermata di Bandito, mostrata in *Figura 4.8*, è anch'essa dotata di un unico binario e ha subito un *restyling* nel 2016, in contemporanea all'elettrificazione della tratta Bra - Alba, che ha comportato l'innalzamento del marciapiede a 55 cm, conforme agli standard europei.



Figura 4.6 - Stazione di Sommariva del Bosco



Figura 4.7 - Ex-stazione (oggi fermata) di Sanfrè



Figura 4.8 - Fermata di Bandito

Sulla tratta Carmagnola - Bra le velocità di fiancata sono comprese tra i 120 km/h e i 135 km/h, ad eccezione degli ultimi 1,5 km adiacenti alla stazione di Bra, in cui la velocità è limitata a 60 km/h, in entrambi i sensi di marcia; vige il Blocco Conta Assi.

Anche la stazione di Bra è stata oggetto di profondo rinnovamento: attualmente dispone di cinque binari passanti ed uno tronco, marciapiedi conformi agli standard europei coperti da pensiline e serviti da sottopassaggio ed ascensori.

La tratta Bra - Alba è a binario semplice, trazione elettrica e dotata di Blocco Conta Assi. Fa parte della ferrovia Cavallermaggiore - Alessandria e ha velocità di fiancata variabili fra i 55 km/h e i 95 km/h. Le stazioni attualmente abilitate agli incroci sono, oltre a Bra, quelle di Santa Vittoria d'Alba e di Alba. Le restanti località di servizio, ossia Pocapaglia, Monticello d'Alba e Mussotto, sono fermate dotate di un solo binario. Né la stazione di Santa Vittoria d'Alba né quella di Alba sono dotate di sottopassaggi, pertanto non sono abilitate ai movimenti in contemporanea dei treni. La prima è dotata di due binari e la seconda di tre, e solo in quest'ultima i marciapiedi sono conformi allo standard europeo di 55 cm di altezza.



Figura 4.9 - Stazione di Alba

La tratta Cavallermaggiore - Bra della ferrovia Alessandria - Cavallermaggiore, oggi utilizzata dalla linea SFM B, è invece non elettrificata e dotata di Blocco Conta Assi; le velocità di fiancata sono comprese tra i 110 km/h e i 115 km/h.

Le informazioni tecniche qui riportate sono state fornite da RFI tramite i suoi Fascicoli di Linea⁽¹⁷⁾, disponibili sul web, ed altri documenti (quali Profili di Linea, Piani Schematici delle Stazioni ed elaborati progettuali) messi a disposizione in via confidenziale per poter realizzare correttamente il presente lavoro di Tesi.

4.4 Analisi della ripartizione del traffico ferroviario nella parte sud del nodo di Torino tra linea "Genova" e linea "Savona"

Dal momento che le maggiori difficoltà nell'inserire le tracce delle nuove griglie di cadenzamento si sono presentate nell'entrata al nodo di Torino, essendo una parte di rete ad elevatissimo traffico, si analizza come vengono istradati i treni a monte della stazione di Trofarello sulle due linee a doppio binario affiancate, Genova e Savona.

Da registrare, oltre all'elevato numero di tracce orario, l'elevata eterogeneità del traffico ferroviario in questo tratto: vi sono treni merci con differenti composizioni e molteplici tipologie di treni passeggeri. Fra questi si annoverano i treni delle linee 1, 4, 6 e 7 del Servizio Ferroviario Metropolitano, i treni Regionali e Regionali Veloci per Cuneo, Savona/Ventimiglia, Alessandria/Novi Ligure/Genova, i treni a lunga percorrenza di Trenitalia di categorie commerciali InterCity, InterCityNotte e FrecciaBianca diretti verso le linee Tirrenica ed Adriatica. A questi si aggiungono invii materiale e locomotive isolate che si spostano per esigenze di servizio interne degli Operatori Ferroviari.

Si prende in considerazione una giornata tipo nel centro della settimana, in modo da evitare i giorni festivi, i precedenti festivi e i seguenti festivi, in cui circola solitamente un minor numero di treni rispetto al caso più critico. Si è selezionato mercoledì 7 marzo 2018.

⁽¹⁷⁾ Le informazioni sono state reperite sul Fascicolo di Linea n.8 (linee Torino - Fossano - San Giuseppe di Cairo, Carmagnola - Bra, Ceva - Ormea) e sul Fascicolo di Linea n.10 (linee Asti - Castagnole delle Lanze, Alessandria - Cavallermaggiore).

I treni vengono divisi per direzione di viaggio e classificati per categoria commerciale; sono indicati con SFM i treni del Servizio Ferroviario Metropolitano, con R / RV i Regionali e i Regionali Veloci, con IC / ICN i treni a lunga percorrenza del Servizio Universale (InterCity e InterCityNotte), con FB i treni FrecciaBianca, con M l'insieme di tutti i treni merci, con LIS le locomotive isolate e con INV gli invii materiale.

Tabella 4.1 - Istradamento dei treni in uscita dal nodo di Torino (verso Trofarello)

Categoria	SFM	R / RV	IC / ICN	FB	M	LIS	INV	Totale
Linea GE	3	25	5	2	12	4	3	54
Linea SV	69	16	0	0	4	0	2	91

Tabella 4.2 - Istradamento dei treni in entrata nel nodo di Torino (da Trofarello)

Categoria	SFM	R / RV	IC / ICN	FB	M	LIS	INV	Totale
Linea GE	1	31	5	2	18	2	1	60
Linea SV	68	14	0	0	1	0	2	85

Si può osservare come sia presente una parziale specializzazione delle due linee: la quasi totalità delle corse del Servizio Ferroviario Metropolitano viene istradata sulla linea Savona, anche quando questo comporta la prosecuzione su di un binario che non è di corretto tracciato rispetto all'itinerario di ingresso nella stazione di Trofarello. Ciò non comporta perdite di tempo apprezzabili dal momento che tutti i treni di questa categoria commerciale effettuano fermata nella stazione di Trofarello.

Diverso è il caso dei treni Regionali Veloci: essi appaiono distribuiti fra le due linee, con quelli provenienti da Alessandria/Novi Ligure/Genova inseriti in linea Genova, e quelli con origine Cuneo o Savona/Ventimiglia non sempre istradati in linea Savona. Ciò è probabilmente dovuto alla presenza di numerose tracce orario del Servizio Ferroviario Metropolitano nelle fasce di punta che rende vantaggioso o necessario utilizzare la linea Genova. Attualmente tale cambio di istradamento viene effettuato con deviatori posti in radice nord della stazione di Trofarello, aventi limite di velocità di percorrenza in deviate pari a 60 km/h: dal momento che la quasi totalità dei treni RV non effettua fermata a Trofarello, tale cambio di istradamento comporta un allungamento dei tempi

di percorrenza di un minuto circa, poiché il transito semplice è permesso ad una velocità compresa tra i 120 km/h e i 130 km/h, in base al rango del materiale rotabile.

Il medesimo discorso è valido anche per i treni merci, per le locomotive isolate e per gli invii materiale.

Tutti i treni a lunga percorrenza sono invece istradati in linea Genova, senza alcuna perdita di tempo, dal momento che proseguono sui loro binari di corsa.

Tutte le suddette considerazioni sono valide, in maniera speculare, per la direzione opposta, ossia per i treni in uscita dal nodo di Torino.

Si nota, infine, come la quantità di treni inseriti in linea Savona sia distintamente maggiore di quelli inseriti in linea Genova: ciò è ragionevole dal momento che nel secondo caso la circolazione è fortemente eterotachica, a causa dei differenti servizi espletati e delle conseguenti differenze di materiale rotabile.

4.5 Definizione del materiale rotabile

Per ottenere correttamente il modello per la simulazione è fondamentale definire in maniera dettagliata il materiale rotabile che espleta le corse.

Per conoscere queste informazioni ci si è avvalsi della Piattaforma PIC Web di Rete Ferroviaria Italiana, dalla quale si sono selezionate le composizioni pianificate.

Attualmente, per la linea SFM 4 vengono utilizzati nelle fasce di punta i convogli a composizione bloccata conosciuti come "TAF", mentre nel resto della giornata sono impiegati gli elettrotreni "Jazz" a 5 elementi. Il primo rotabile, il cui acronimo sta per Treno ad Alta Frequentazione, è un elettrotreno a due piani adibito al servizio regionale, costituito da 4 elementi (ALe426 + Le736 + Le736 + ALe506). Esso offre 475 posti a sedere (di cui 1 per persone con disabilità motorie) e circa 200 posti in piedi, viaggia in rango B, ha un'accelerazione massima allo spunto di 0,7 m/s² e una velocità massima di 140 km/h. Il secondo rotabile, anch'esso a composizione bloccata, noto come ETR.425, è un convoglio a singolo piano dedicato al servizio regionale. Offre 305 posti a sedere (di cui 2 per persone con disabilità motorie) e circa 160 posti in piedi, viaggia in rango C, ha un'accelerazione massima allo spunto di 0,846 m/s² e una velocità massima di

160 km/h. All'interno del modello si è scelto di utilizzare solo i più recenti ETR.425, aventi migliori *performance* di marcia; la minore offerta di posti a sedere per corsa è compensata dal raddoppio della frequenza dei passaggi. I convogli TAF in esubero nel modello sono stati destinati ad espletare tutte le corse della linea SFM 7, anch'essa attualmente a gestione mista, analoga a quella della SFM 4.

Per tutte le restanti relazioni di viaggio non sono state effettuate modifiche al materiale rotabile attualmente utilizzato e l'assegnazione è stata dunque la seguente:

- SFM 1: “Minuetto” elettrico in doppia composizione (ALe501 + Le220 + ALe502 + ALe501 + Le220 + ALe502);
- SFM 6: “Jazz” a 5 elementi (ALe425 + Le425 + Le425 + Le425 + ALe425);
- SFM B: “Minuetto” diesel (ALn501 + Ln220 + ALn502);
- R/RV da/per Cuneo, Ventimiglia e Genova: locomotore E.464 con 8 carrozze passeggeri (di cui 7 MDVE e 1 UIC-X semipilota);
- R/RV da/per Savona, Alessandria e Novi Ligure: locomotore E.464 con 6 carrozze passeggeri (di cui 5 MDVC ordinarie e 1 MDVC semipilota);
- IC da/per Genova: locomotore E.402b con 4 carrozze passeggeri (UIC-Z1 di seconda classe);
- IC da/per Salerno: locomotore E.402b con 8 carrozze passeggeri (di cui 2 GranConfort di prima classe, 5 UIC-Z1 di seconda classe e 1 UIC-Z1 semipilota di seconda classe);
- ICN da/per Salerno, Lecce: locomotore E.402b con 8 carrozze passeggeri (di cui 2 UIC-X con posti a sedere Basic di seconda classe, 5 UIC-X con cuccette Comfort e 1 MU vagone-letto Deluxe);
- FB da/per Roma, Lecce: locomotore E.402b con 9 carrozze passeggeri (di cui 2 GranConfort di prima classe, 6 UIC-Z1 di seconda classe e 1 UIC-Z1 semipilota di seconda classe).

Il materiale rotabile assegnato al servizio regionale (SFM e R/RV) ha una velocità massima di 160 km/h, ad eccezione di “TAF” e “Minuetto” diesel, il cui limite è rispettivamente di 140 km/h e 130 km/h. Per quanto riguarda i restanti treni, ossia quelli a lunga percorrenza, la velocità massima è sempre di 200 km/h tranne che nel caso degli InterCityNotte, per i quali è di 160 km/h.

Per quanto riguarda il rango di circolazione, tutti i treni a lunga percorrenza viaggiano in rango C, come anche “Minuetto” e “Jazz”; i Treni ad Alta Frequentazione e i convogli composti da E464 più carrozze MDVC o MDVE viaggiano in rango B.

Ai convogli per invio materiale è stato forfettariamente assegnato il rotabile ETR.425.

È necessario poi fare un approfondimento per quanto riguarda treni merci e locomotive isolate. Dal momento che nel sistema modellizzato transitano all'interno delle 24 ore tipo un elevato numero di treni merci aventi composizioni assai differenti per tipologia e numero di locomotori, massa rimorchiata, percentuale di massa frenata (P.M.F.), tipo di frenatura (viaggiatori/merci) e lunghezza dei convogli, si è deciso di categorizzarli in 13 tipologie. Fattori discriminanti sono stati i locomotori impiegati e le masse rimorchiate.

Tabella 4.3 - Categorizzazione dei treni merci

Tipologia	Locomotore	Massa rim. [t]	P.M.F. [%]	Velocità max [km/h]	Rango	Tipo Freno
M_01	D.100	700	75	100	A	V
M_02	D.100 + D.100	650	75	100	A	V
M_03	D.100 + D.100	1600	60	100	A	V
M_04	D.445	600	75	100	A	V
M_05	D.445 + D.445	1200	75	100	A	V
M_06	D.520 + D.520	1300	70	100	A	V
M_07	E.191	800	75	100	A	M
M_08	E.483	800	75	100	A	V
M_09	E.633	600	75	100	A	V
M_10	E.633	1600	75	100	A	V
M_11	E.652	650	75	100	A	V
M_12	E.652	1490	75	100	A	V
M_13	E.655	1300	75	100	A	M

Tali tipologie sono state definite concentrandosi sui treni che impegnano una rilevante porzione della rete oggetto di studio, ossia quelli che transitano sulla ferrovia Torino - Fossano. Per i convogli presenti solo come transito nella stazione di Trofarello, essendo l'influenza delle loro prestazioni trascurabile, sono state assegnate le tipologie in base all'Impresa Ferroviaria che è risultata responsabile del treno, per analogie con le altre corse di maggior rilievo.

Le locomotive isolate sono invece state classificate in maniera seguente.

Tabella 4.4 - Categorizzazione delle locomotive isolate

Tipologia	Composizione	Massa [t]	P.M.F. [%]	Velocità max [km/h]	Rango	Tipo freno
I_LIS	E.652 + E.652	212	70	120	A	M
I_TRA	D.146	76	95	120	A	M

Per ciascuna tipologia di convoglio disponibile sono state inserite all'interno del software di simulazione SASTRE le seguenti informazioni:

- codice identificativo della tipologia (ID);
- massa totale;
- lunghezza totale;
- accelerazione massima;
- velocità massima;
- coefficiente di omogeneizzazione per la presenza di masse rotanti (β);
- rango ferroviario;
- percentuale di massa frenata;
- tipo di frenatura;
- tipo di convoglio;
- coefficienti a , b , c per il calcolo della resistenza ordinaria specifica al moto con formula trinomia;
- composizione del convoglio;
- caratteristica meccanica di trazione.

La curva che descrive la caratteristica meccanica di trazione è stata ottenuta per punti, con una discretizzazione di 1 km/h. Si è costruita per ciascun locomotore o elemento motorizzato di treni a composizione bloccata, o a partire da quella già fornita nelle schede tecniche dei rotabili oppure da Rete Ferroviaria Italiana, o tramite calcoli dai dati disponibili di potenza e sforzo massimo all'avviamento.

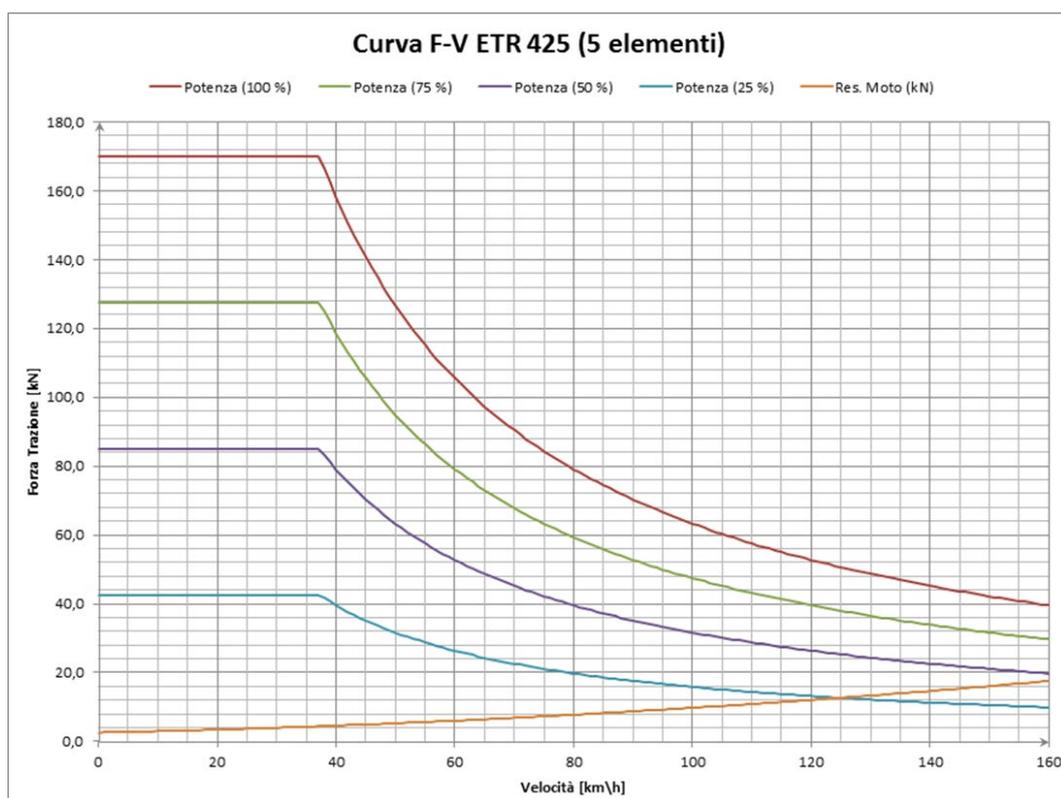


Figura 4.10 - Esempio di caratteristica meccanica di trazione fornita da RFI

Per il calcolo delle resistenze ordinarie specifiche al moto si sono seguite le indicazioni presenti in letteratura (Dalla Chiara, 2012), adottando i seguenti coefficienti.

Tabella 4.5 - Coefficienti selezionati per il calcolo delle resistenze ordinarie specifiche al moto

Tipologia	Formula adottata	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>
Treni passeggeri	<i>Common materials train (Italy)</i>	2,0	0,0	0,00028
Treni merci	<i>Mixed freight cars (Strahl)</i>	2,5	0,0	0,00050
Locomotive isolate	<i>Isolated locomotives</i>	2,5	0,0	0,00030

Dopo aver inserito tutti i suddetti dati si è ottenuto un *depot*, in cui erano presenti tutti i convogli, ciascuno con le sue caratteristiche tecniche.

Ai fini della simulazione, non essendo presenti linee di montagna con acclività importanti, è stato possibile trascurare il ruolo dei sistemi di frenatura elettrodinamica (*Bed*) ed elettropneumatica (*Bpn*) eventualmente in dotazione al materiale rotabile.

Il simulatore reso disponibile all'interno del pacchetto SASTRE è infatti in grado di modellizzare i transitori di frenatura come a decelerazione costante, calcolando automaticamente questo valore a seconda del grado di frenatura e del sistema di controllo e segnalamento presenti sul tratto di linea in esame e dei valori di percentuale

di massa frenata e tipo di freno impostati per il materiale rotabile in oggetto. Il valore di decelerazione costante è ricavato dalle tabelle di frenatura (tabelle B) della Prefazione Generale all'Orario di Servizio, come quel valore che permette l'arresto del treno in 1000 metri a partire dalla velocità massima riportata da dette tabelle in corrispondenza dei succitati valori.

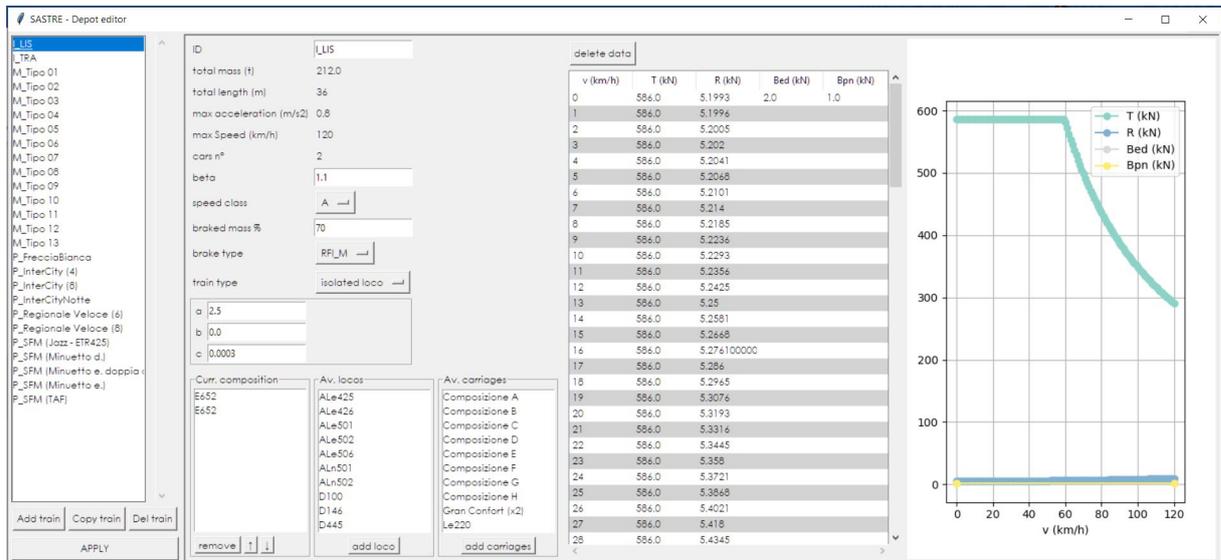


Figura 4.11 - SASTRE: editor del materiale rotabile

Capitolo 5

Statistiche su tempi e ritardi

Dal momento che l'esercizio ferroviario, seppure sia basato su una rigorosa pianificazione, presenta quotidianamente diversi fenomeni aleatori, si è deciso di approfondirne l'influenza che essi esercitano sul sistema studiato.

Le grandezze assunte come non deterministiche in questo studio sono i tempi di percorrenza fra due località di servizio consecutive, il ritardo all'origine della corsa (sia esso un vero e proprio ritardo in partenza, come nella stazione di Alba, oppure un ritardo di entrata nel sistema simulato, ad esempio a Trofarello, per i treni in uscita dal nodo di Torino) e il tempo di fermata in ciascuna località di servizio in cui viene effettuato servizio passeggeri.

Il presente lavoro di Tesi si focalizza sulla costruzione di griglie di cadenzamento per i tratti Trofarello - Alba del SFM 4 e Trofarello - Alba via Cavallermaggiore di eventuali nuovi Regionali Veloci diretti da Torino Porta Nuova ad Alba, pertanto le variabili stocastiche presentate vengono studiate per la porzione di rete ferroviaria che interessa tali servizi.

Tutti i dati sperimentali sono stati prelevati dalla Piattaforma PIC Web di Rete Ferroviaria Italiana, scegliendo come periodo di riferimento il mese di marzo 2018, per i motivi già espressi nel *paragrafo 4.2*.

5.1 Tempi di percorrenza minimi

Dopo aver creato delle tracce orario modello che costituissero l'elemento di partenza per la costruzione delle griglie di cadenzamento dei due servizi da studiare, si è verificata la coerenza tra i tempi di percorrenza tra le località di servizio consecutive simulati sul software SASTRE e quelli reali.

Dal momento che nella simulazione ogni treno segue un profilo di marcia ottimale, che sfrutta in ogni momento al meglio le prestazioni dei convogli, compatibilmente con le caratteristiche dell'infrastruttura, è naturale ottenere dei tempi inferiori a quelli pianificati nelle tracce orario commerciali. Ciò è legato sia all'impossibilità da parte del

personale di condotta di eseguire un profilo di marcia standardizzato e ideale (come può invece essere impostato per i sistemi di trasporto ad impianto fisso completamente automatizzati), sia alla presenza dell'allungamento per puntualità e dell'allungamento per lavori (che servono a rendere più stabile l'orario e permettere, nei limiti del possibile, il recupero di un eventuale ritardo rispetto all'orario pianificato), sia all'approssimazione per eccesso al minuto intero dell'orario di arrivo (nel caso sia offerto servizio viaggiatori) o ai 30 secondi dell'orario di transito (sosta non prevista).

Risulta allora utile, ai fini della costruzione di tracce orario che battano tempi di percorrenza approssimati al minuto intero, confrontare il valore simulato con quello minimo praticamente ottenibile.

Tali valori possono essere tipicamente ottenuti per via sperimentale, cronometrando delle corse di prova istruendo il macchinista circa la necessità di ottenere i minimi tempi di percorrenza, ovviamente nel rispetto di tutti i limiti tecnici e regolamentari in vigore.

Nel caso in oggetto non è stato possibile disporre di tali valori sperimentali, si è pertanto provveduto a ricavarli dai dati di circolato storico disponibili sulla piattaforma PIC Web. Tali valori tipicamente vengono riscontrati in corse che procedono in lieve ritardo, dal momento che il personale di condotta cerca di recuperarlo sfruttando al massimo le prestazioni del materiale rotabile, compatibilmente con i vincoli imposti dall'infrastruttura. Nel caso di rilevante ritardo invece può invece sopraggiungere la perdita della propria traccia orario e, di conseguenza, la difficoltà nel seguire un profilo di marcia ideale.

Sono riportati nelle tabelle seguenti, relativamente alla linea SFM 4, i tempi di percorrenza da traccia orario commerciale (offerta a marzo 2018), quelli minimi sperimentali (individuati nel circolato del medesimo mese) e quelli simulati sul software. Per ciascuna coppia di località viene indicato il tipo di percorrenza, ossia se vengono effettuate soste (a servizio dei viaggiatori) o semplice transito. È immediato comprendere che in caso di sosta il tempo di percorrenza sia maggiore a causa delle fasi di accelerazione o decelerazione necessarie.

Tabella 5.1 - Tempi di percorrenza per percorso Trofarello - Alba (linea SFM 4)

Tratta	Tipo di percorrenza	Tempo di percorrenza (mm:ss)		
		Da traccia orario commerciale	Minimo sperimentale	Simulato su SASTRE
Trofarello → → Villastellone	Sosta - Sosta	05:00	03:00	03:49
Villastellone → → Carmagnola	Sosta - Sosta	06:00	04:00	04:48
Carmagnola → → Sommariva del Bosco	Sosta - Sosta	07:00	04:30	05:12
Sommariva del Bosco → → Sanfrè	Sosta - Sosta	03:00	02:30	02:14
Sanfrè → → Bandito	Sosta - Sosta	03:00	02:30	02:27
Bandito → → Bra	Sosta - Sosta	08:00	03:30	04:13
Bra → → Pocapaglia	Sosta - Sosta	05:00	-	04:20
Pocapaglia → → S. Vittoria d'Alba	Sosta - Sosta	03:00	-	01:50
S. Vittoria d'Alba → → Monticello d'Alba	Sosta - Sosta	04:00	04:00	03:09
Monticello d'Alba → → Mussotto	Sosta - Sosta	04:00	04:00	03:13
Mussotto → → Alba	Sosta - Sosta	04:00	02:00	02:15

I tempi di percorrenza minimi sperimentali non sono disponibili per i percorsi che comprendono la fermata di Pocapaglia, in quanto nel mese di marzo 2018 essa non era servita dai treni Torino Stura - Alba, che vi effettuavano semplice transito.

Tabella 5.2 - Tempi di percorrenza per percorso Alba - Trofarello (linea SFM 4)

Tratta	Tipo di percorrenza	Tempo di percorrenza (mm:ss)		
		Da traccia orario commerciale	Minimo sperimentale	Simulato su SASTRE
Alba → → Mussotto	Sosta - Sosta	03:00	02:30	02:00
Mussotto → → Monticello d'Alba	Sosta - Sosta	04:00	04:00	03:15
Monticello d'Alba → → S. Vittoria d'Alba	Sosta - Sosta	04:00	03:30	03:21
S. Vittoria d'Alba → → Pocapaglia	Sosta - Sosta	04:00	-	01:51
Pocapaglia → → Bra	Sosta - Sosta	06:00	-	05:08
Bra → → Bandito	Sosta - Sosta	05:00	05:00	03:25
Bandito → → Sanfrè	Sosta - Sosta	03:00	02:30	02:24
Sanfrè → → Sommariva del Bosco	Sosta - Sosta	03:00	02:30	02:10
Sommariva del Bosco → → Carmagnola	Sosta - Sosta	08:00	04:30	05:19
Carmagnola → → Villastellone	Sosta - Sosta	05:00	04:30	04:40
Villastellone → → Trofarello	Sosta - Sosta	06:00	04:00	04:06

Anche in questo caso i tempi di percorrenza minimi sperimentali non sono disponibili per i percorsi che comprendono la fermata di Pocapaglia, non essendo neppure servita dai treni Alba - Torino Stura, che vi effettuavano semplice transito.

Per le eventuali corse Regionali Veloci di nuova istituzione Torino Porta Nuova - Torino Lingotto - Carmagnola - Cavallermaggiore - Bra - Alba si sono considerati i dati di tracce orario commerciali relative alle corse RV per Cuneo o per Savona/Ventimiglia fino a Cavallermaggiore (a partire dalle quali saranno generate queste), mentre per il tratto Cavallermaggiore - Alba (non essendo oggi presenti tali servizi) si sono ipotizzati dei valori facendo riferimento ai tempi di percorrenza stimati da Rete Ferroviaria Italiana.

Tabella 5.3 - Tempi di percorrenza per percorso Trofarello - Alba (linea RV via Cavallermaggiore)

Tratta	Tipo di percorrenza	Tempo di percorrenza (mm:ss)		
		Da traccia orario commerciale	Minimo sperimentale	Simulato su SASTRE
Trofarello → → Villastellone	Transito - Transito	04:00	03:00	03:06
Villastellone → → Carmagnola	Transito - Sosta	04:00	03:00	03:53
Carmagnola → → Racconigi	Sosta - Transito	05:00	04:30	04:18
Racconigi → → Cavallermaggiore	Transito - Sosta	03:00	03:00	03:51
Cavallermaggiore → → Madonna del Pilone	Sosta - Transito	04:00	-	04:40
Madonna del Pilone → → Bra	Transito - Sosta	04:30	-	04:47
Bra → → Pocapaglia	Sosta - Transito	04:30	04:30	05:30
Pocapaglia → → S. Vittoria d'Alba	Transito - Transito	01:30	-	01:23
S. Vittoria d'Alba → → Monticello d'Alba	Transito - Transito	02:30	-	02:44
Monticello d'Alba → → Mussotto	Transito - Transito	03:00	-	02:42
Mussotto → → Alba	Transito - Sosta	02:00	-	01:58

I tempi di percorrenza minimi sperimentali sono anch'essi riferiti alle corse dei Regionali Veloci per Cuneo o per Savona/Ventimiglia fino a Cavallermaggiore, mentre non sono disponibili per il percorso successivo (ad eccezione del tratto Bra - Pocapaglia) in quanto non sono ancora stati realizzati dei collegamenti rapidi che transitino in tutte le fermate ad eccezione di Bra ed Alba.

Tabella 5.4 - Tempi di percorrenza per percorso Alba - Trofarello (linea RV via Cavallermaggiore)

Tratta	Tipo di percorrenza	Tempo di percorrenza (mm:ss)		
		Da traccia orario commerciale	Minimo sperimentale	Simulato su SASTRE
Alba → → Mussotto	Sosta - Transito	02:00	-	02:01
Mussotto → → Monticello d'Alba	Transito - Transito	03:00	-	02:41
Monticello d'Alba → → S. Vittoria d'Alba	Transito - Transito	02:30	-	02:55
S. Vittoria d'Alba → → Pocapaglia	Transito - Transito	01:30	-	01:16
Pocapaglia → → Bra	Transito - Sosta	04:30	04:00	05:16
Bra → → Madonna del Pilone	Sosta - Transito	05:00	-	04:41
Madonna del Pilone → → Cavallermaggiore	Transito - Sosta	03:30	-	03:46
Cavallermaggiore → → Racconigi	Sosta - Transito	05:00	04:00	03:36
Racconigi → → Carmagnola	Transito - Sosta	06:00	03:30	04:05
Carmagnola → → Villastellone	Sosta - Transito	05:00	04:00	04:00
Villastellone → → Trofarello	Transito - Transito	05:00	03:30	02:59

Anche in questo caso i tempi di percorrenza minimi sperimentali non sono disponibili per il percorso da Alba a Cavallermaggiore (ad eccezione del tratto Pocapaglia - Bra) in quanto non sono ancora stati realizzati dei collegamenti rapidi che transitino in tutte le fermate ad eccezione di Alba e Bra, mentre nel tratto da Cavallermaggiore in poi si fa riferimento ai dati dei RV provenienti da Cuneo o da Savona/Ventimiglia.

5.2 Ritardo in uscita dal nodo di Torino

L'attenzione volge ora al ritardo con cui i treni iniziano la propria corsa. Dal momento che il sistema viene analizzato a partire dalla stazione di Trofarello, il punto iniziale delle corse in uscita dal nodo di Torino viene considerato a circa 3,5 km a monte della suddetta

stazione, in direzione del capoluogo. Dal momento che il la porzione del sistema ferroviario in esame più congestionata e, dunque, più critica per l'insorgenza e la propagazione di perturbazioni alla circolazione, è l'intero nodo di Torino, è ragionevole concentrare l'attenzione sulla sezione immediatamente a valle di esso.

Per i treni che effettuano fermata a Trofarello il dato selezionato è il ritardo all'arrivo, mentre per gli altri è il ritardo del transito. Dovendo progettare le griglie di cadenzamento di due servizi differenti (Servizio Ferroviario Metropolitano e Regionali Veloci) si è deciso di controllare se ci fossero differenze nelle statistiche inerenti ai loro ritardi. Le corse di riferimento sono state rispettivamente quelle della linea SFM 4 e quelle dei RV per Cuneo o per Savona/Ventimiglia. Differenziare le statistiche risulta corretto, dal momento che sono visibili difformità non trascurabili; ciò può essere legato al diverso impiego delle linee Savona e Genova, trattato nel *paragrafo 4.4*, oppure alla diversa provenienza delle corse, rispettivamente passante ferroviario (Torino Stura) e stazione centrale di Torino Porta Nuova.

Per trattare il ritardo in uscita dal nodo di Torino, inoltre, si è deciso di differenziare anche i convogli che partono nelle fasce di punta (06:00-09:00, 12:30-14:30 e 17:30-19:30) da quelli del resto della giornata (fasce di morbida).

Dal momento che sono presenti dei treni che arrivano in anticipo è necessario poter ammettere anche dei valori negativi del ritardo. Si è optato dunque per trattare questa grandezza come una variabile aleatoria descritta da una distribuzione lognormale a tre parametri: media, varianza e *shift* (o scostamento). Una normale distribuzione lognormale (a due parametri) infatti non ammette valori negativi: il terzo è legato al limite inferiore della distribuzione stessa (Maione & Moisello, 1993).

Per costruire tali distribuzioni si è effettuato un campionamento dei ritardi a partire dai dati disponibili sulla piattaforma PIC Web di RFI per il mese di marzo 2018 e tramite il *tool Distribution Fitter* di MATLAB® sono state calcolate le funzioni di ripartizione (CDF, *Cumulative Distribution Function*) e densità di probabilità (PDF, *Probability Density Function*).

Di seguito sono presentati i risultati, dapprima per i treni del Servizio Ferroviario Metropolitano e successivamente per i Regionali Veloci.

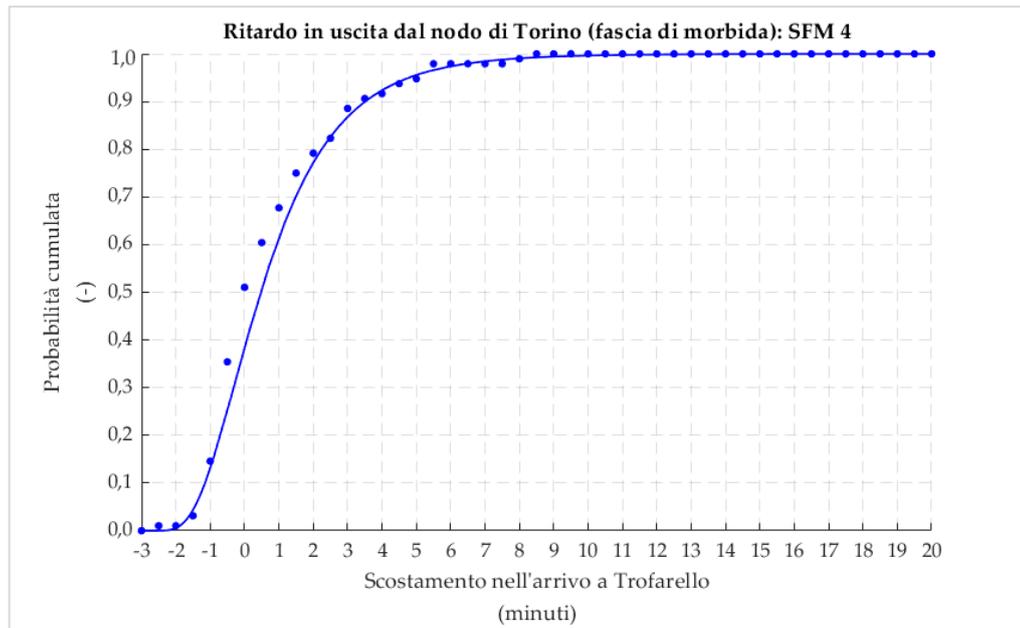


Figura 5.1 - CDF del ritardo in uscita dal nodo di Torino (fascia di morbida): SFM 4

Per il ritardo in uscita dal nodo di Torino, all'interno della fascia di morbida, relativamente ai treni del SFM 4, si è ottenuto un valore medio di 55 secondi, una deviazione standard di 2 minuti e 3 secondi e uno *shift* di 3 minuti.

L'equazione che descrive la funzione di ripartizione è:

$$P(x) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cdot \operatorname{erf} \left(\frac{\ln(x+3) - 1,2439}{0,4909 \sqrt{2}} \right) \quad (5.1)$$

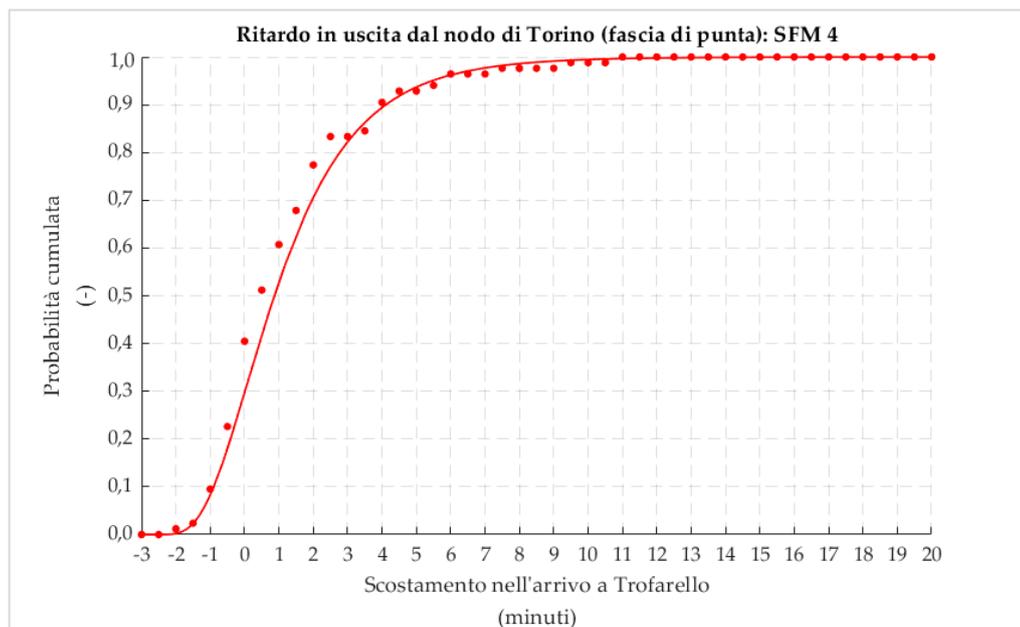


Figura 5.2 - CDF del ritardo in uscita dal nodo di Torino (fascia di punta): SFM 4

Per il ritardo in uscita dal nodo di Torino, all'interno della fascia di punta, relativamente ai treni dell'SFM 4, si è ottenuto un valore medio di 1 minuto e 20 secondi, una deviazione standard di 2 minuti e 11 secondi e uno *shift* di 3 minuti.

L'equazione che descrive la funzione di ripartizione è:

$$P(x) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cdot \operatorname{erf} \left(\frac{\ln(x+3) - 1,3523}{0,4755 \sqrt{2}} \right) \quad (5.2)$$

A partire da queste CDF si sono derivate le seguenti PDF: se messe a confronto si nota come nella fascia di punta i ritardi si distribuiscano verso valori più elevati.

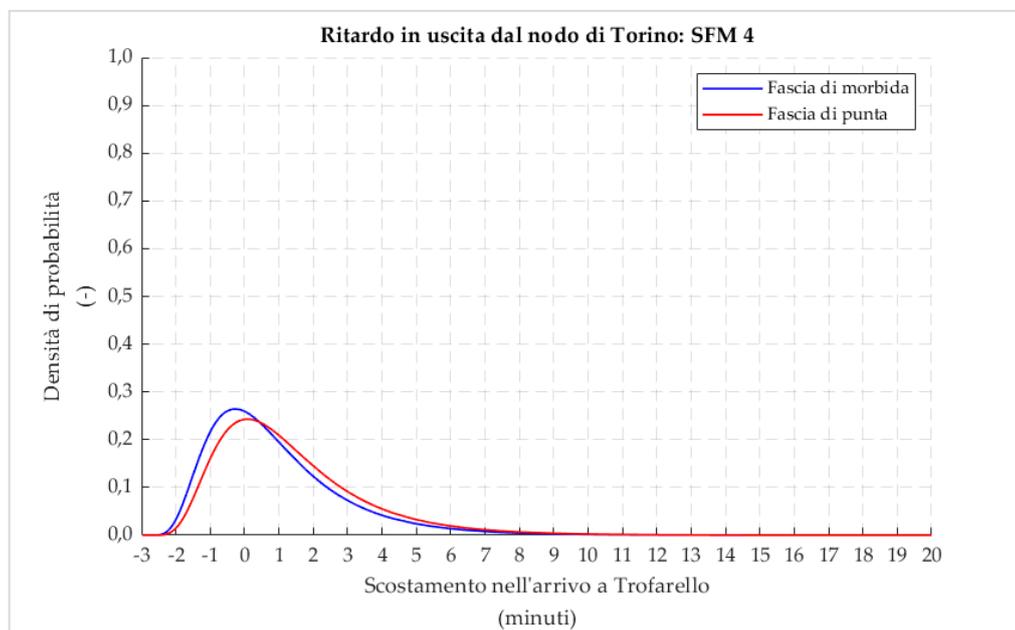


Figura 5.3 - PDF del ritardo in uscita dal nodo di Torino: SFM 4

La funzione densità di probabilità per la fascia di morbida risulta:

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot 0,4909 \cdot (x+3)} \cdot e^{-\frac{(\ln(x+3) - 1,2439)^2}{2 \cdot 0,4909^2}} \quad (5.3)$$

La funzione densità di probabilità per la fascia di punta risulta:

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot 0,4755 \cdot (x+3)} \cdot e^{-\frac{(\ln(x+3) - 1,3523)^2}{2 \cdot 0,4755^2}} \quad (5.4)$$

Si considerano ora i treni Regionali Veloci.

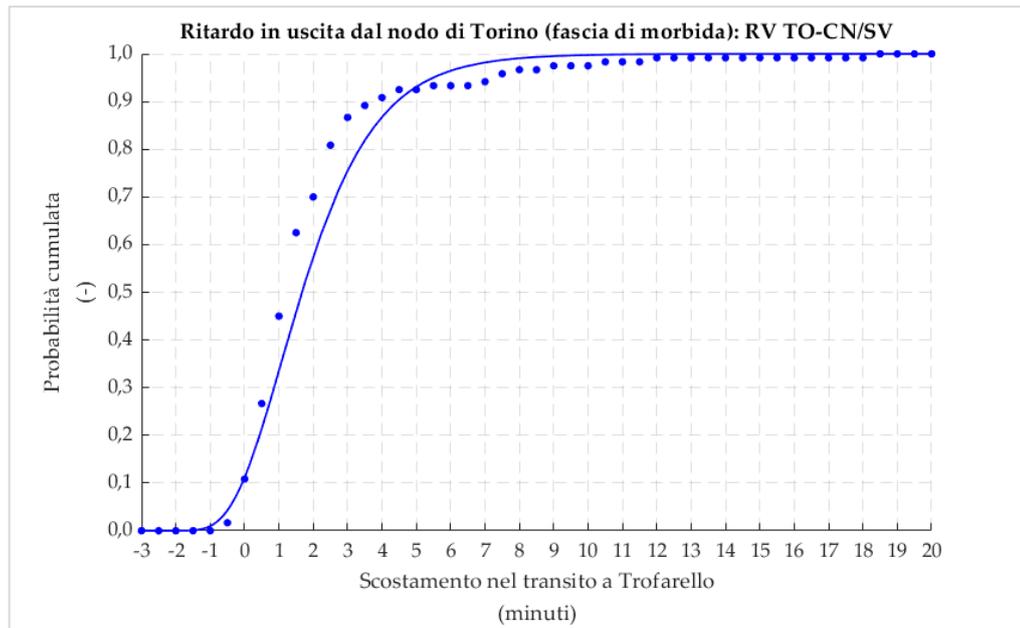


Figura 5.4 - CDF del ritardo in uscita dal nodo di Torino (fascia di morbida): RV TO-CN/SV

Per il ritardo in uscita dal nodo di Torino, all'interno della fascia di morbida, relativamente ai treni RV per Cuneo o Savona/Ventimiglia, si è ottenuto un valore medio di 1 minuto e 59 secondi, una deviazione standard di 1 minuto e 52 secondi e uno *shift* di 3 minuti.

L'equazione che descrive la funzione di ripartizione è:

$$P(x) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cdot \operatorname{erf} \left(\frac{\ln(x+3) - 1,5411}{0,3632 \sqrt{2}} \right) \quad (5.5)$$

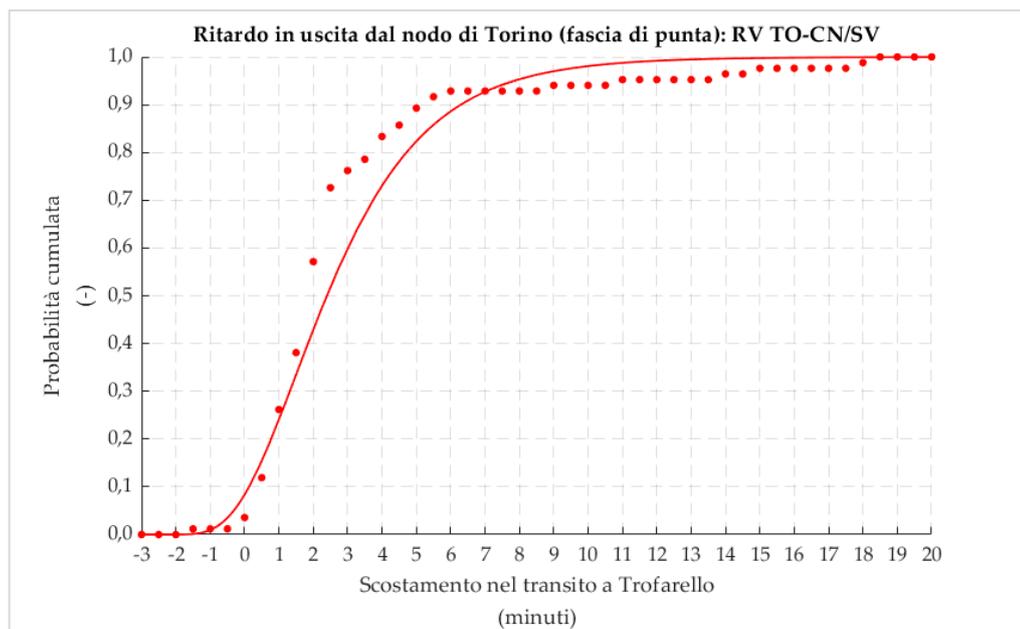


Figura 5.5 - CDF del ritardo in uscita dal nodo di Torino (fascia di punta): RV TO-CN/SV

Per il ritardo in uscita dal nodo di Torino, all'interno della fascia di punta, relativamente ai treni RV per Cuneo o Savona/Ventimiglia, si è ottenuto un valore medio di 2 minuto e 54 secondi, una deviazione standard di 2 minuti e 37 secondi e uno *shift* di 3 minuti.

L'equazione che descrive la funzione di ripartizione è:

$$P(x) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cdot \operatorname{erf} \left(\frac{\ln(x+3) - 1,6853}{0,4244 \sqrt{2}} \right) \quad (5.6)$$

A partire da queste CDF si sono derivate le seguenti PDF: se messe a confronto si nota come nella fascia di punta i ritardi si distribuiscano vistosamente verso valori più elevati.

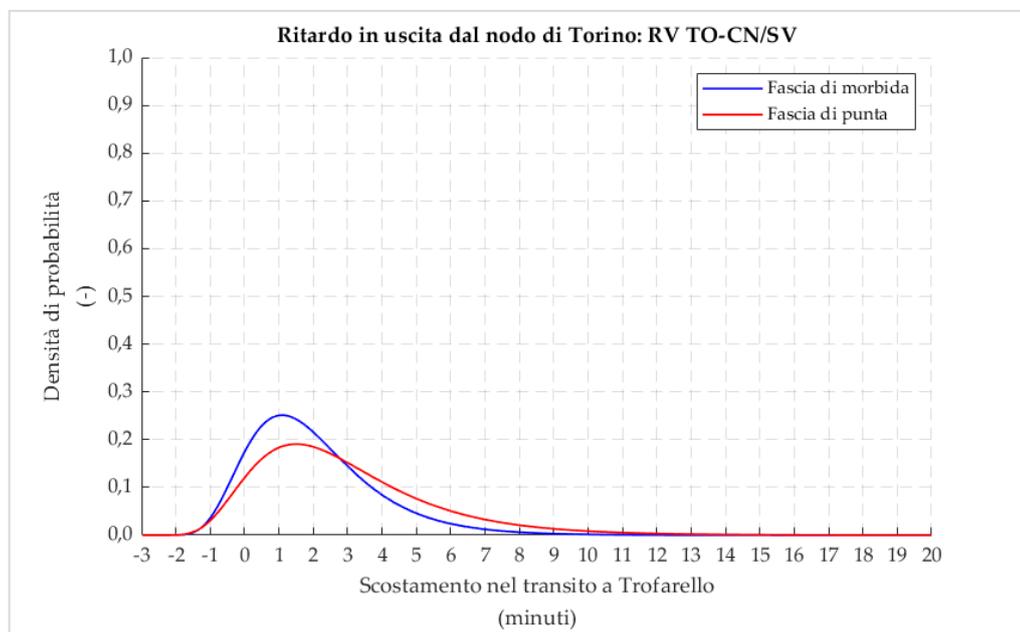


Figura 5.6 - Comparazione delle PDF del ritardo in uscita dal nodo di Torino

La funzione densità di probabilità per la fascia di morbida risulta:

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot 0,3632 \cdot (x+3)} \cdot e^{-\frac{(\ln(x+3) - 1,5411)^2}{2 \cdot 0,3632^2}} \quad (5.7)$$

La funzione densità di probabilità per la fascia di punta risulta:

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot 0,4244 \cdot (x+3)} \cdot e^{-\frac{(\ln(x+3) - 1,6853)^2}{2 \cdot 0,4244^2}} \quad (5.8)$$

5.3 Ritardo in partenza da Alba

Per i treni oggetto di studio che viaggiano in direzione nord il punto di partenza è la stazione di Alba. Ad oggi vi hanno origine solo le corse della linea SFM 4, pertanto è su tali dati che vengono costruite le statistiche. Non viene ammessa la partenza in anticipo. Non è stato necessario distinguere la giornata in fasce di punta e di morbida, dal momento che il ritardo alla partenza non è risultato correlato all'orario.

Si è adottata una distribuzione esponenziale (negativa), la quale viene descritta da un solo parametro, il valore medio, e i risultati sono presentati di seguito.

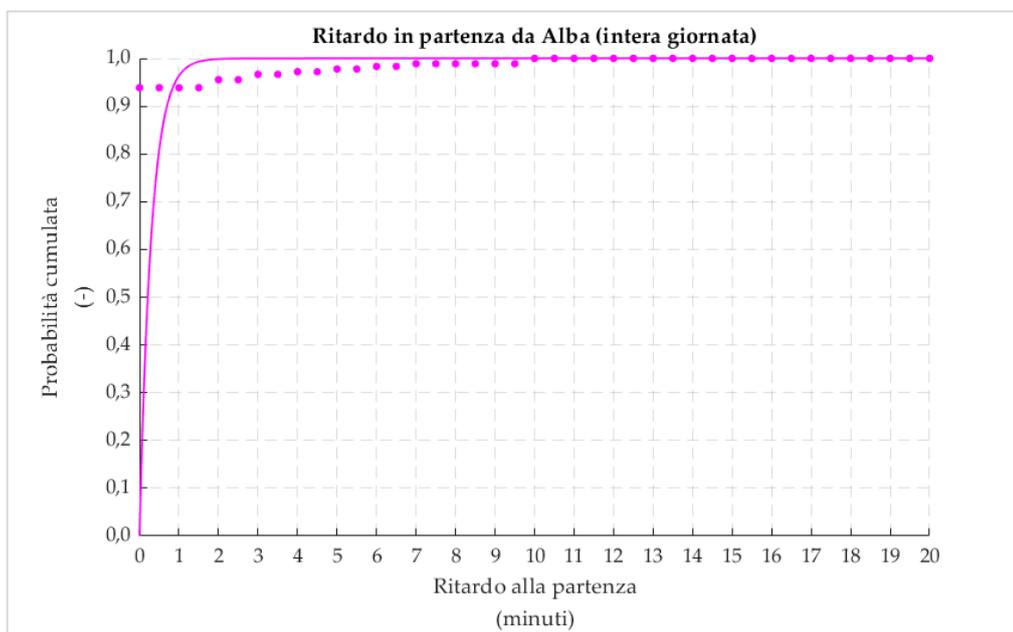


Figura 5.7 - CDF del ritardo in partenza da Alba

Facendo dunque riferimento all'intera giornata, risulta un valore medio di 18 secondi.

L'equazione che descrive la funzione di ripartizione è:

$$P(x) = 1 - e^{-\frac{1}{0,3018}x} \quad (5.9)$$

Da questa è possibile ottenere per derivazione la funzione densità di probabilità:

$$p(x) = \frac{1}{0,3018} e^{-\frac{1}{0,3018}x} \quad (5.10)$$



Figura 5.8 - PDF del ritardo in partenza da Alba

5.4 Tempi di fermata nelle località di servizio

Dai paragrafi precedenti si evince come, mediamente, per le corse oggetto di studio i ritardi in entrata nel sistema considerato siano contenuti e, pertanto, spesso recuperabili grazie all'allungamento per puntualità inserito nelle tracce orario.

Un'ulteriore perturbazione viene però data dalla variabilità dei tempi di fermata alle stazioni: sebbene essi siano pianificati e solitamente pari a 1 o 2 minuti (valori maggiori sono richiesti dove viene effettuato un incrocio su una linea a binario semplice), in molte località non è possibile considerare deterministico questo intervallo di tempo.

Consultando la piattaforma PIC Web di RFI sono stati campionati i tempi di fermata (approssimati in multipli di 30 secondi), facendo riferimento al mese di marzo 2018 e alle corse della linea SFM 4 (Torino Stura - Alba e vv.), per tutte le località in cui è stato effettuato servizio passeggeri, ad eccezione della stazione di Cavallermaggiore, ove si è fatto riferimento ai treni della linea SFM 7 (Torino Stura - Fossano e vv.). Nel dettaglio, sono state selezionate le corse appartenenti alle griglie di cadenzamento orario, pertanto sono state escluse le coppie di rinforzo su Torino Porta Nuova e le corse con percorso più breve (ad esempio Torino Stura - Bra). I giorni selezionati sono stati quelli centrali della settimana, ossia i martedì, i mercoledì e i giovedì. Dal momento che si vuole studiare il minimo tempo di fermata

necessario ad espletare il servizio passeggeri sono stati scartati tutti i dati relativi alle soste in cui il treno è arrivato in anticipo, poiché in caso contrario si introdurrebbe un errore sistematico (*bias*) nel campionamento. Sono stati anche eliminati i (rari) casi in cui la partenza è avvenuta in anticipo, poiché condizione non ammessa dall'orario pianificato. Si è infine provveduto inoltre alla rimozione di eventuali dati errati (*outlier*) o mancanti.

Dall'analisi si è constatato che è possibile considerare un tempo di fermata deterministico, pari a 60 secondi, per l'intera giornata, per le località seguenti:

- Sanfrè;
- Bandito;
- Pocapaglia;
- Monticello d'Alba;
- Mussotto.

Ciò è ragionevole, essendo semplici fermate non dotate di segnali di partenza, in cui la mole di passeggeri limitata permette che le operazioni discesa e salita dei passeggeri avvengano nel giro di un minuto.

Per la fermata di Villastellone e tutte le restanti località, stazioni fornite di segnali di partenza, si è trattato il tempo di sosta come una variabile aleatoria descritta da una distribuzione lognormale a due parametri. Dal momento che l'aleatorietà è legata all'incarozzamento dei passeggeri, si è deciso di analizzare separatamente le corse delle fasce di punta e di morbida.

Nella stazione di Trofarello si è ottenuto per la fascia di morbida un tempo di fermata medio di 1 minuto e 30 secondi con deviazione standard di 54 secondi, mentre per la fascia di punta si ha una media di 1 minuto e 33 secondi con deviazione standard di 59 secondi.

Le equazioni che descrivono le rispettive funzioni di ripartizione sono:

$$P(x) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cdot \operatorname{erf} \left(\frac{\ln(x) - 0,2451}{0,5596 \sqrt{2}} \right) \quad (5.11)$$

$$P(x) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cdot \operatorname{erf} \left(\frac{\ln(x) - 0,2741}{0,5788 \sqrt{2}} \right) \quad (5.12)$$

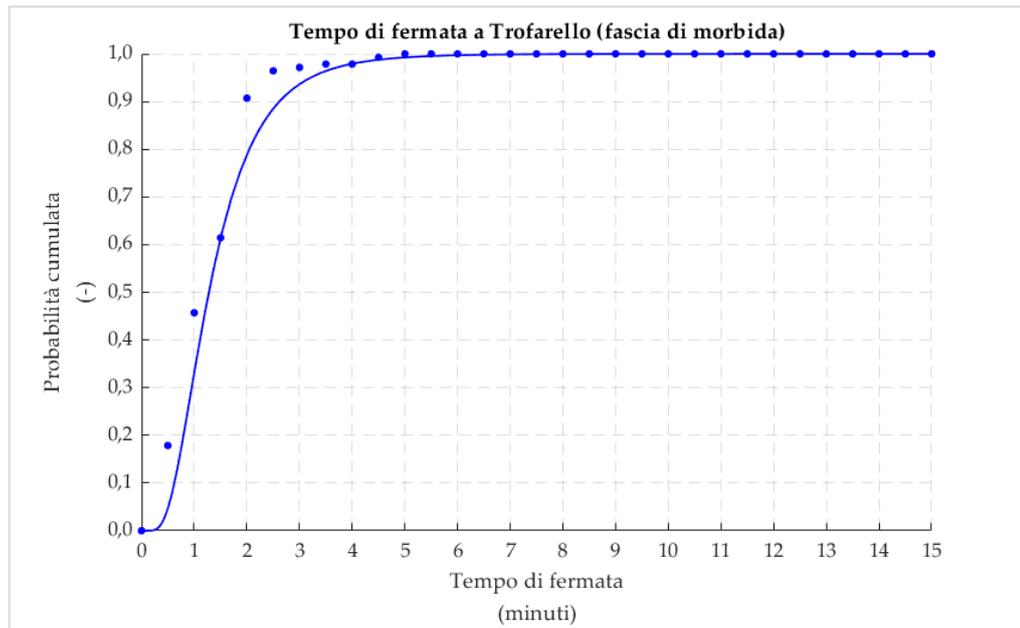


Figura 5.9 - CDF del tempo di fermata a Trofarello (fascia di morbida)

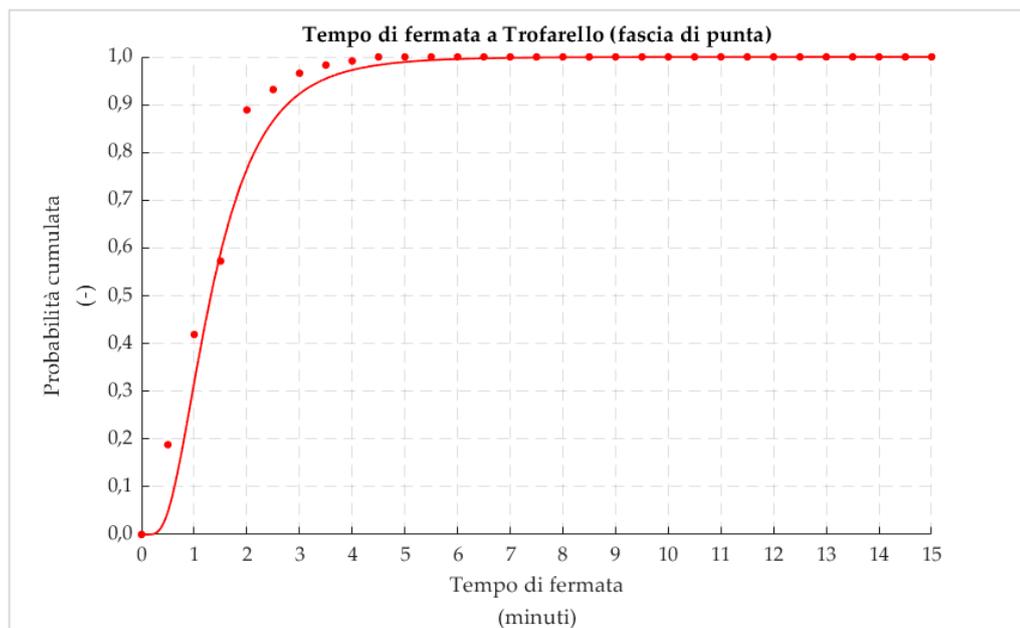


Figura 5.10 - CDF del tempo di fermata a Trofarello (fascia di punta)

La funzione densità di probabilità per la fascia di morbida risulta:

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot 0,5596 \cdot x} \cdot e^{-\frac{(\ln(x)-0,2451)^2}{2 \cdot 0,5596^2}} \quad (5.13)$$

La funzione densità di probabilità per la fascia di punta risulta:

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot 0,5788 \cdot x} \cdot e^{-\frac{(\ln(x)-0,2741)^2}{2 \cdot 0,5788^2}} \quad (5.14)$$

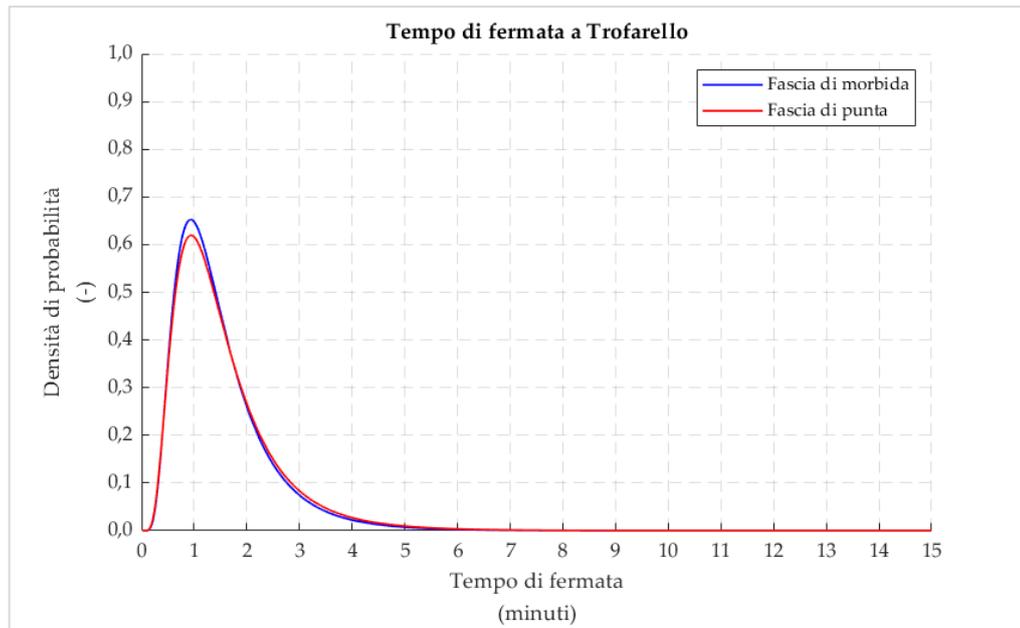


Figura 5.11 - Comparazione delle PDF del tempo di fermata a Trofarello

Nella fermata di Villastellone si è ottenuto per la fascia di morbida un tempo di fermata medio di 1 minuto e 39 secondi con deviazione standard di 41 secondi, mentre per la fascia di punta si ha una media di 1 minuto e 46 secondi con deviazione standard di 41 secondi.

Le equazioni che descrivono le rispettive funzioni di ripartizione sono:

$$P(x) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cdot \operatorname{erf} \left(\frac{\ln(x) - 0,4227}{0,4008 \sqrt{2}} \right) \quad (5.15)$$

$$P(x) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cdot \operatorname{erf} \left(\frac{\ln(x) - 0,5009}{0,3718 \sqrt{2}} \right) \quad (5.16)$$

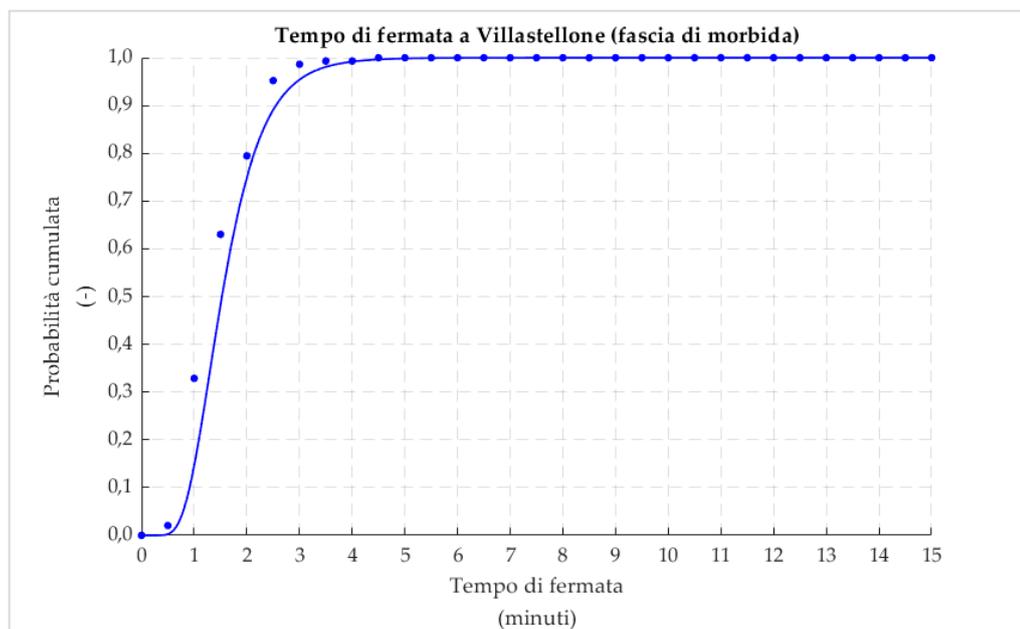


Figura 5.12 - CDF del tempo di fermata a Villastellone (fascia di morbida)

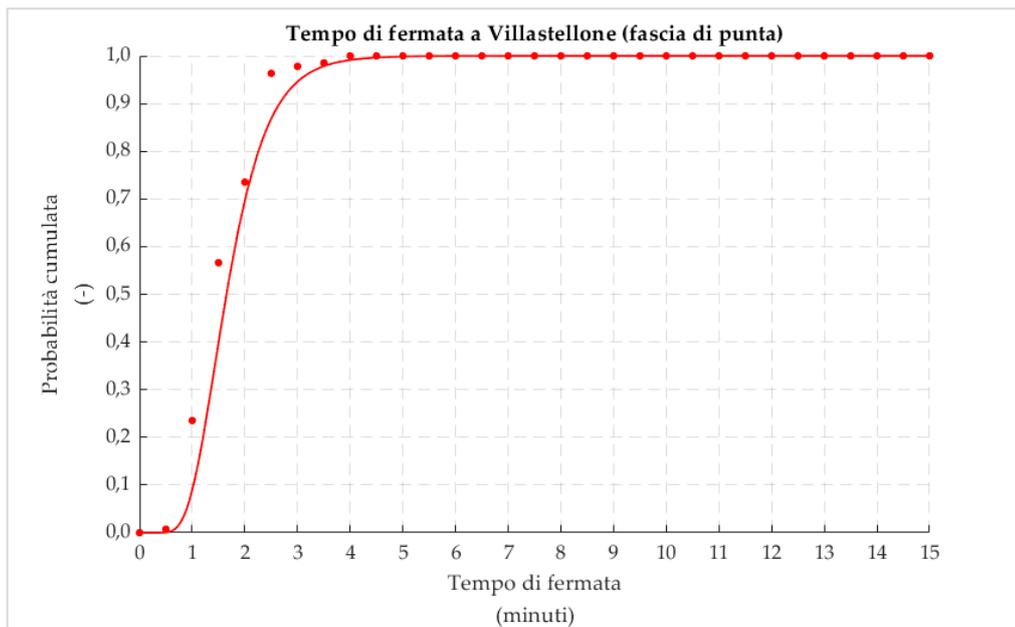


Figura 5.13 - CDF del tempo di fermata a Villastellone (fascia di punta)

La funzione densità di probabilità per la fascia di morbida risulta:

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot 0,4008 \cdot x} \cdot e^{-\frac{(\ln(x)-0,4227)^2}{2 \cdot 0,4008^2}} \tag{5.17}$$

La funzione densità di probabilità per la fascia di punta risulta:

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot 0,3718 \cdot x} \cdot e^{-\frac{(\ln(x)-0,5009)^2}{2 \cdot 0,3718^2}} \tag{5.18}$$

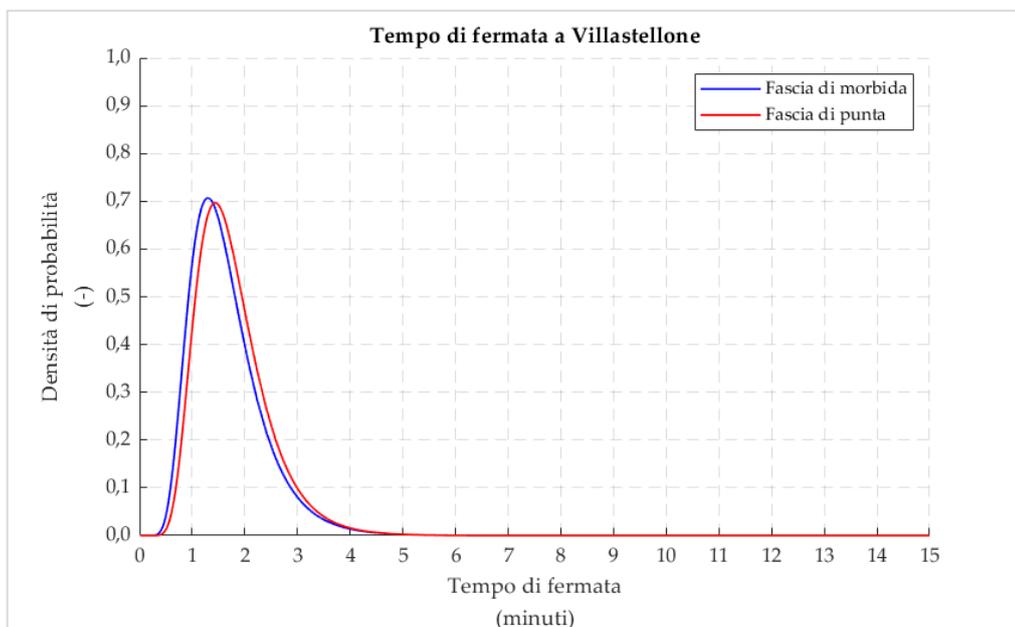


Figura 5.14 - Comparazione delle PDF del tempo di fermata a Villastellone

Nella stazione di Carmagnola si è ottenuto per la fascia di morbida un tempo di fermata medio di 2 minuti e 9 secondi con deviazione standard di 52 secondi, mentre per la fascia di punta si ha una media di 2 minuti e 24 secondi con deviazione standard di 58 secondi.

Le equazioni che descrivono le rispettive funzioni di ripartizione sono:

$$P(x) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cdot \operatorname{erf}\left(\frac{\ln(x)-0,6887}{0,3859\sqrt{2}}\right) \quad (5.19)$$

$$P(x) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cdot \operatorname{erf}\left(\frac{\ln(x)-0,8013}{0,3889\sqrt{2}}\right) \quad (5.20)$$

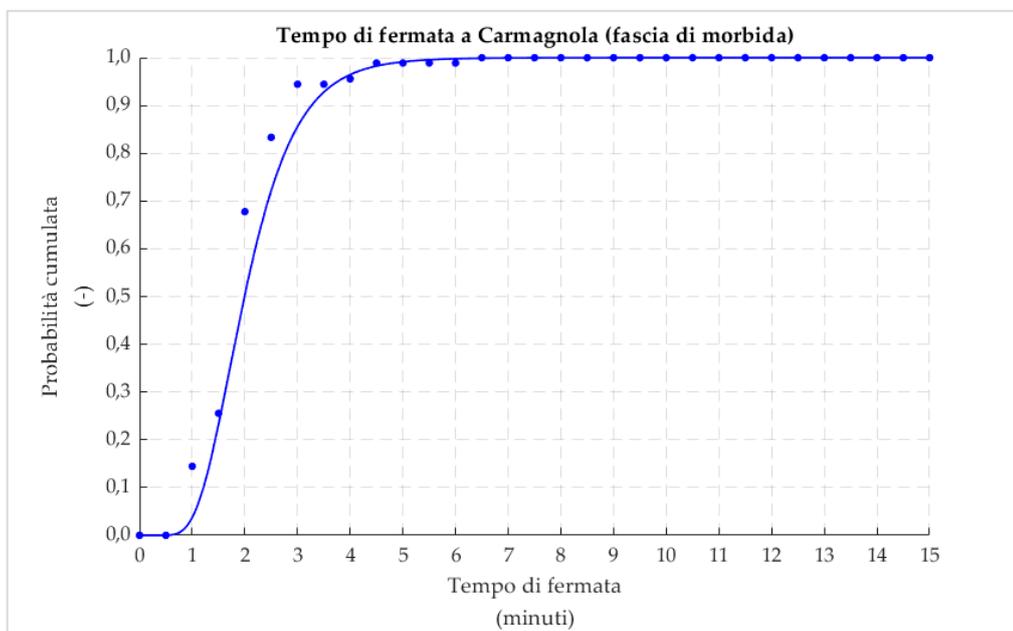


Figura 5.15 - CDF del tempo di fermata a Carmagnola (fascia di morbida)

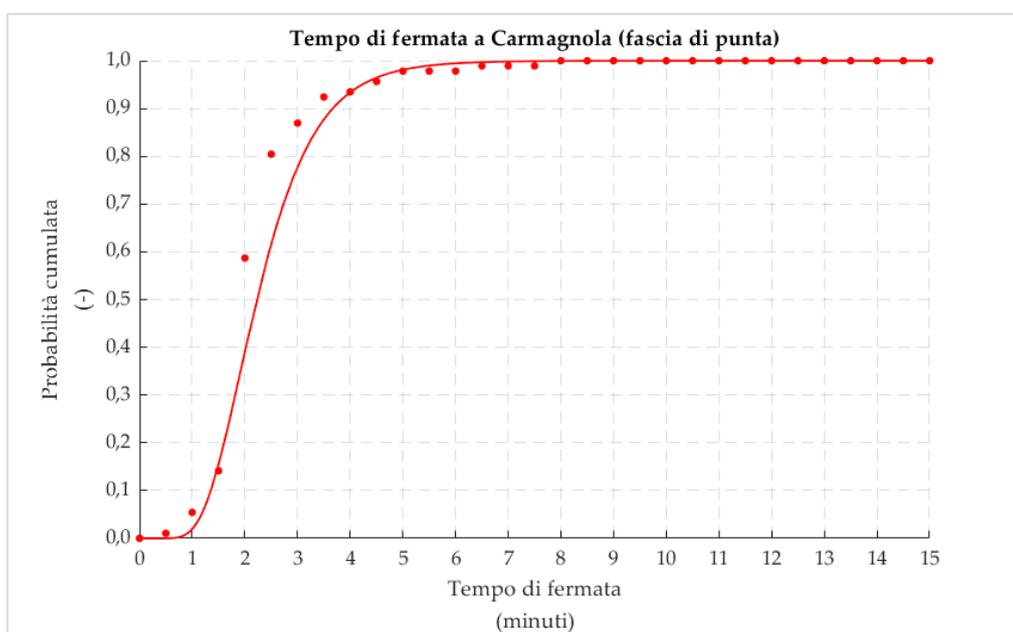


Figura 5.16 - CDF del tempo di fermata a Carmagnola (fascia di punta)

La funzione densità di probabilità per la fascia di morbida risulta:

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot 0,3859 \cdot x} \cdot e^{-\frac{(\ln(x)-0,6887)^2}{2 \cdot 0,3859^2}} \quad (5.21)$$

La funzione densità di probabilità per la fascia di punta risulta:

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot 0,3889 \cdot x} \cdot e^{-\frac{(\ln(x)-0,8013)^2}{2 \cdot 0,3889^2}} \quad (5.22)$$

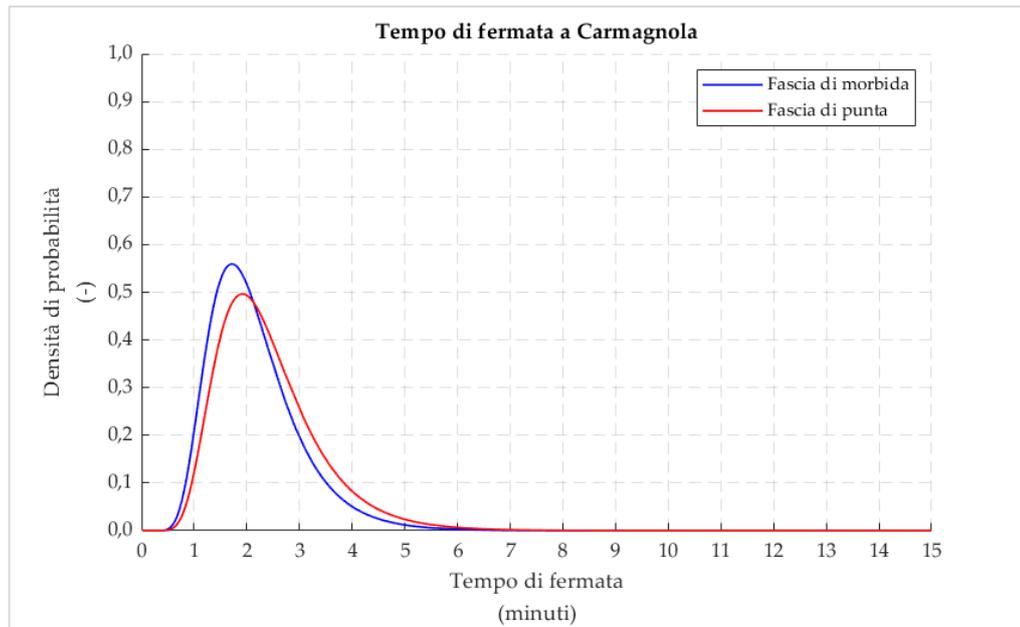


Figura 5.17 - Comparazione delle PDF del tempo di fermata a Carmagnola

Nella stazione di Cavallermaggiore si è ottenuto per la fascia di morbida un tempo di fermata medio di 1 minuto e 86 secondi con deviazione standard di 28 secondi, mentre per la fascia di punta si ha una media di 1 minuto e 82 secondi con deviazione standard di 24 secondi.

Le equazioni che descrivono le rispettive funzioni di ripartizione sono:

$$P(x) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cdot \operatorname{erf}\left(\frac{\ln(x)-0,3036}{0,3230 \sqrt{2}}\right) \quad (5.23)$$

$$P(x) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cdot \operatorname{erf}\left(\frac{\ln(x)-0,2635}{0,2925 \sqrt{2}}\right) \quad (5.24)$$

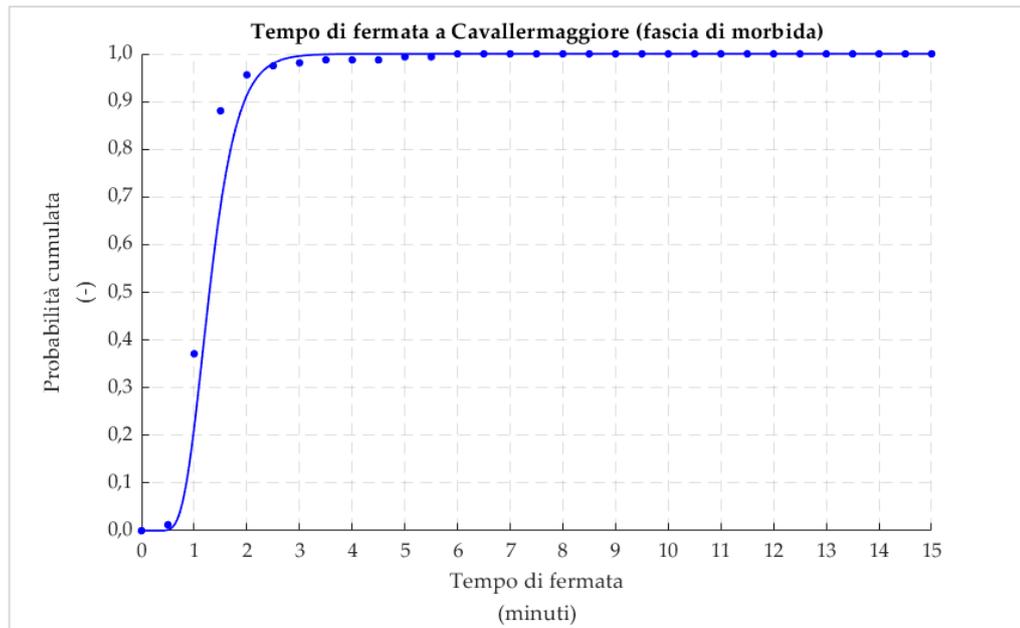


Figura 5.18 - CDF del tempo di fermata a Cavallermaggiore (fascia di morbida)

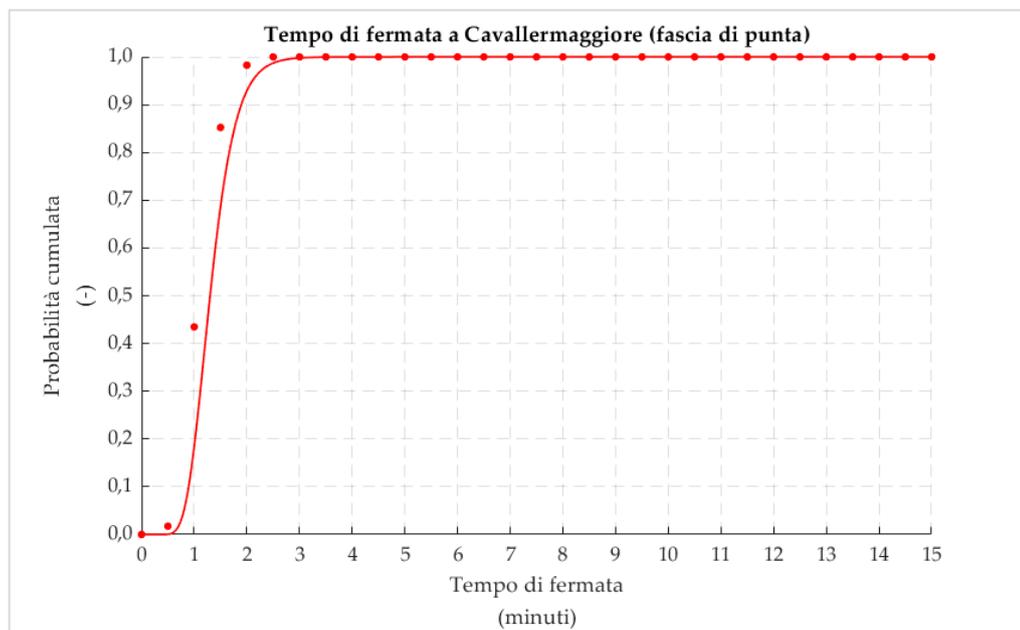


Figura 5.19 - CDF del tempo di fermata a Cavallermaggiore (fascia di punta)

La funzione densità di probabilità per la fascia di morbida risulta:

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot 0,3230 \cdot x} \cdot e^{-\frac{(\ln(x)-0,3036)^2}{2 \cdot 0,3230^2}} \quad (5.25)$$

La funzione densità di probabilità per la fascia di punta risulta:

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot 0,2925 \cdot x} \cdot e^{-\frac{(\ln(x)-0,2635)^2}{2 \cdot 0,2925^2}} \quad (5.26)$$

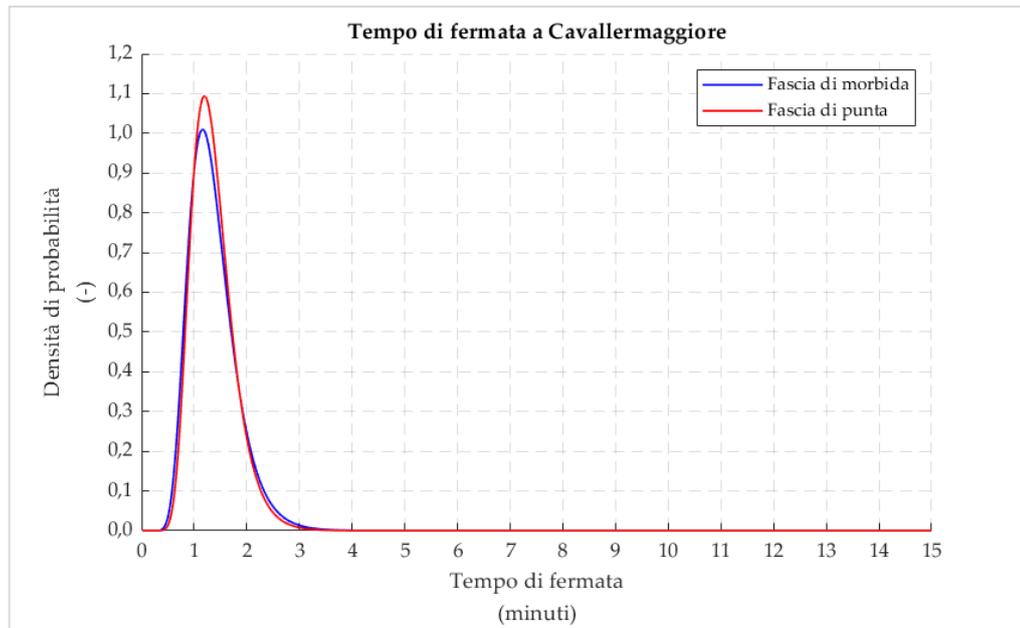


Figura 5.20 - Comparazione delle PDF del tempo di fermata a Cavallermaggiore

Nella stazione di Sommariva del Bosco si è ottenuto per la fascia di morbida un tempo di fermata medio di 1 minuto e 1 secondo con deviazione standard di 7 secondi, mentre per la fascia di punta si ha una media di 1 minuto e 9 secondi con deviazione standard di 24 secondi.

Le equazioni che descrivono le rispettive funzioni di ripartizione sono:

$$P(x) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cdot \operatorname{erf} \left(\frac{\ln(x) - 0,0108}{0,1116 \sqrt{2}} \right) \quad (5.27)$$

$$P(x) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cdot \operatorname{erf} \left(\frac{\ln(x) - 0,0885}{0,3348 \sqrt{2}} \right) \quad (5.28)$$

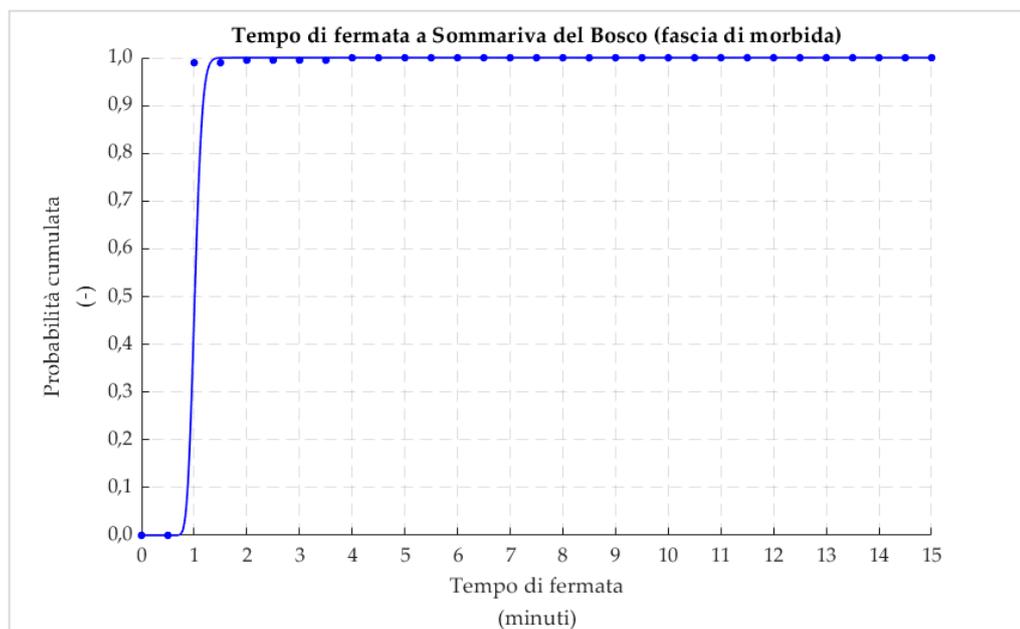


Figura 5.21 - CDF del tempo di fermata a Sommariva del Bosco (fascia di morbida)

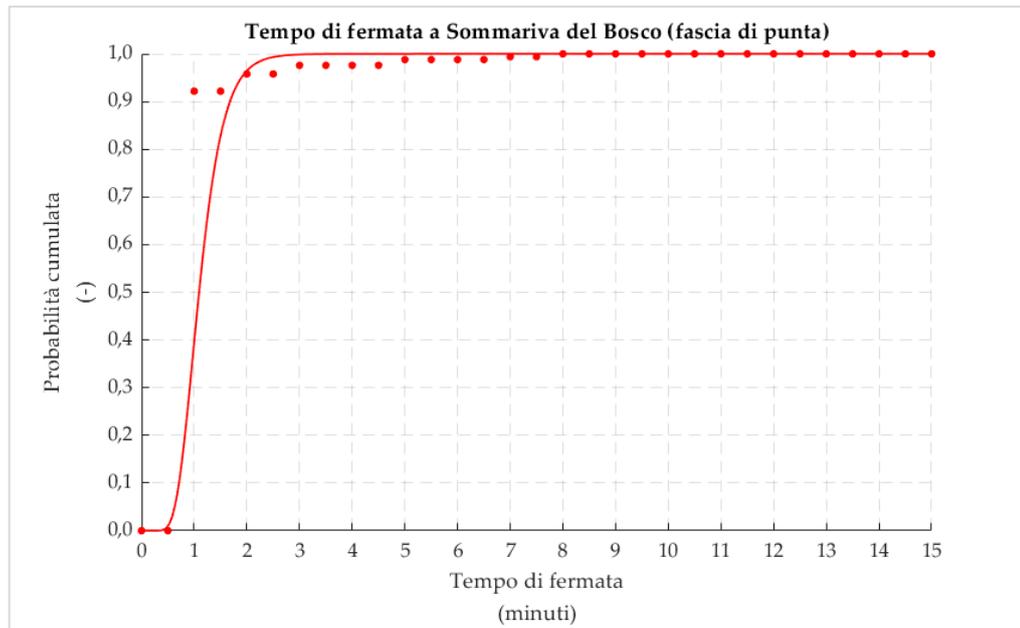


Figura 5.22 - CDF del tempo di fermata a Sommariva del Bosco (fascia di punta)

La funzione densità di probabilità per la fascia di morbida risulta:

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot 0,1116 \cdot x} \cdot e^{-\frac{(\ln(x)-0,0108)^2}{2 \cdot 0,1116^2}} \quad (5.29)$$

La funzione densità di probabilità per la fascia di punta risulta:

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot 0,3348 \cdot x} \cdot e^{-\frac{(\ln(x)-0,0885)^2}{2 \cdot 0,3348^2}} \quad (5.30)$$

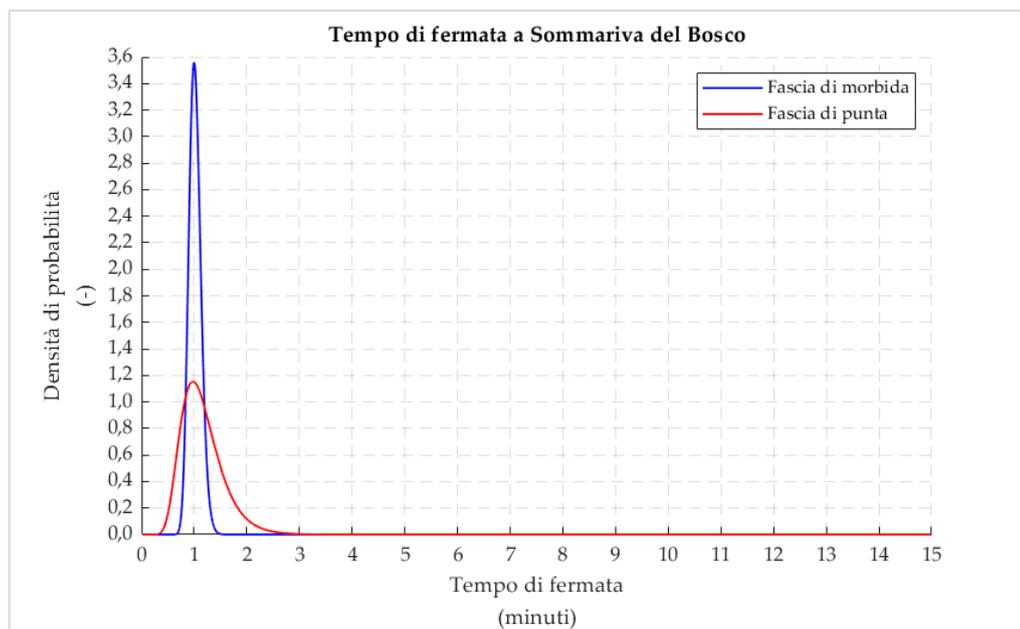


Figura 5.23 - Comparazione delle PDF del tempo di fermata a Sommariva del Bosco

Nella stazione di Bra si è ottenuto per la fascia di morbida un tempo di fermata medio di 2 minuti e 33 secondi con deviazione standard di 78 secondi, mentre per la fascia di punta si ha una media di 2 minuti e 30 secondi con deviazione standard di 66 secondi.

Le equazioni che descrivono le rispettive funzioni di ripartizione sono:

$$P(x) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cdot \operatorname{erf}\left(\frac{\ln(x)-0,8245}{0,4788\sqrt{2}}\right) \quad (5.31)$$

$$P(x) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cdot \operatorname{erf}\left(\frac{\ln(x)-0,8299}{0,4189\sqrt{2}}\right) \quad (5.32)$$

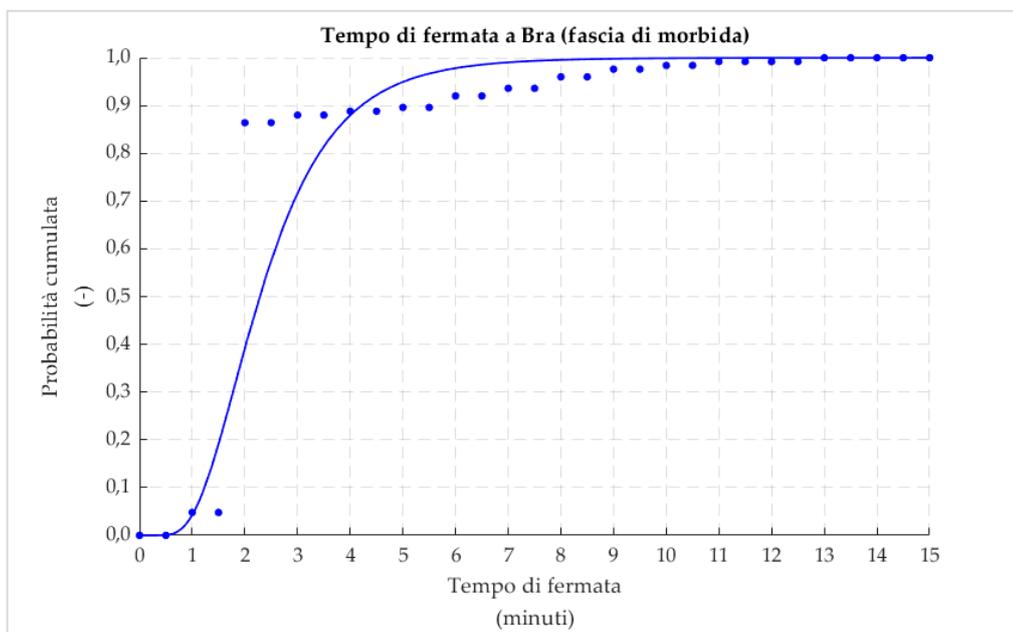


Figura 5.24 - CDF del tempo di fermata a Bra (fascia di morbida)

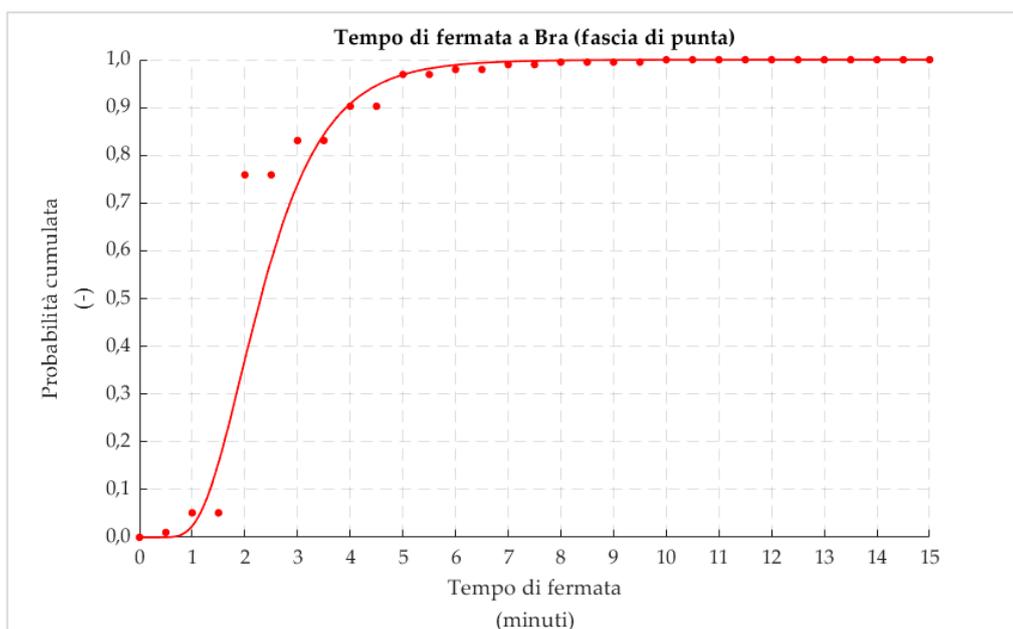


Figura 5.25 - CDF del tempo di fermata a Bra (fascia di punta)

La funzione densità di probabilità per la fascia di morbida risulta:

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot 0,4788 \cdot x} \cdot e^{-\frac{(\ln(x)-0,8245)^2}{2 \cdot 0,4788^2}} \quad (5.33)$$

La funzione densità di probabilità per la fascia di punta risulta:

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot 0,4189 \cdot x} \cdot e^{-\frac{(\ln(x)-0,8299)^2}{2 \cdot 0,4189^2}} \quad (5.34)$$

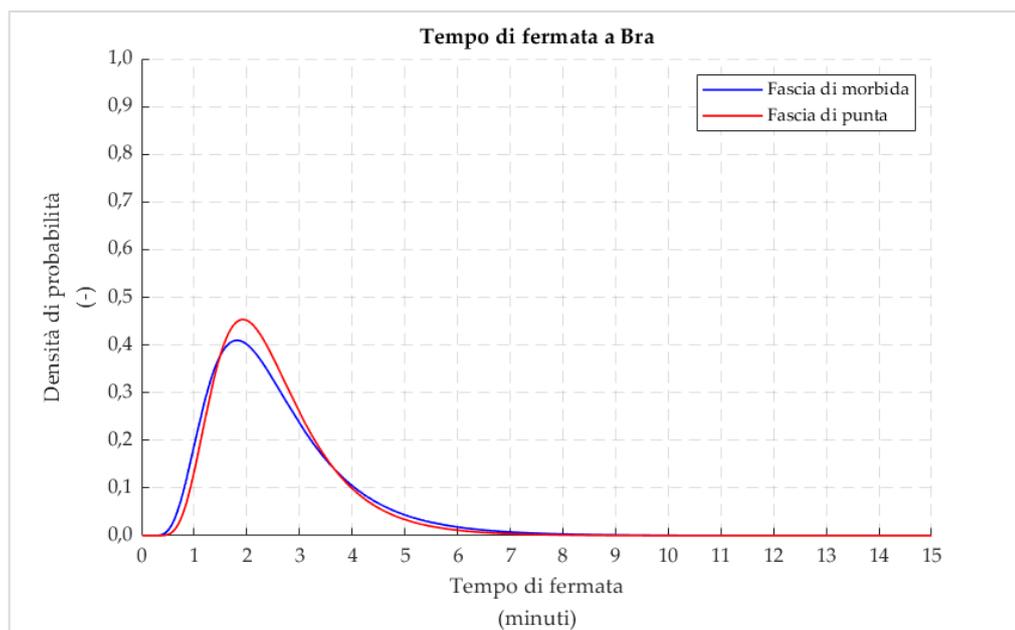


Figura 5.26 - Comparazione delle PDF del tempo di fermata a Bra

Nella stazione di Santa Vittoria d'Alba si è ottenuto per la fascia di morbida un tempo di fermata medio di 1 minuto e 2 secondi con deviazione standard di 12 secondi, mentre per la fascia di punta si ha una media di 1 minuto e 19 secondi con deviazione standard di 40 secondi.

Le equazioni che descrivono le rispettive funzioni di ripartizione sono:

$$P(x) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cdot \operatorname{erf}\left(\frac{\ln(x)-0,0134}{0,1851 \sqrt{2}}\right) \quad (5.35)$$

$$P(x) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cdot \operatorname{erf}\left(\frac{\ln(x)-0,1535}{0,4803 \sqrt{2}}\right) \quad (5.36)$$

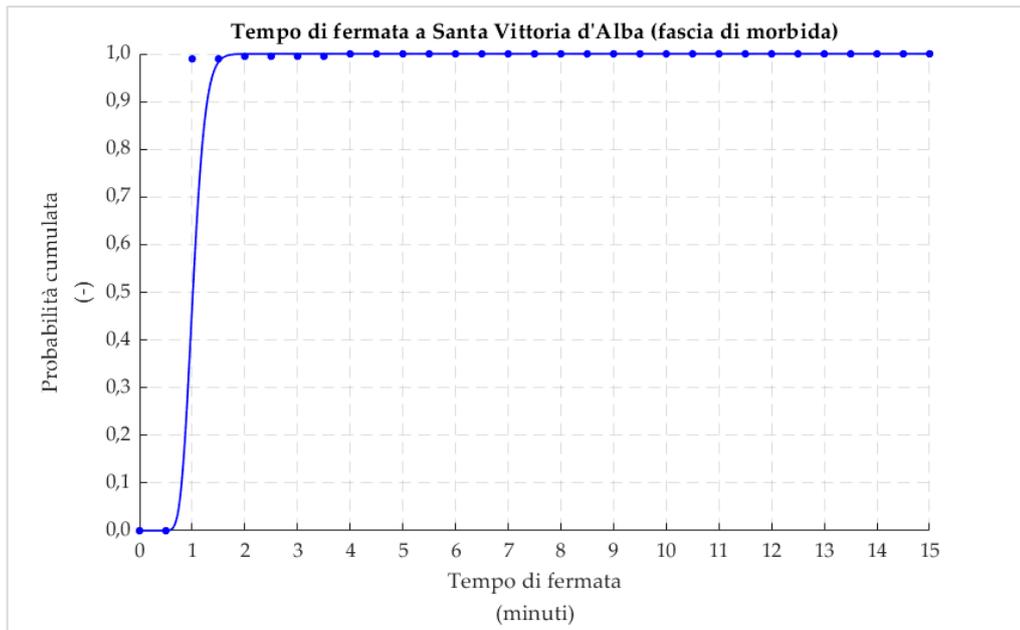


Figura 5.27 - CDF del tempo di fermata a Santa Vittoria d'Alba (fascia di morbida)

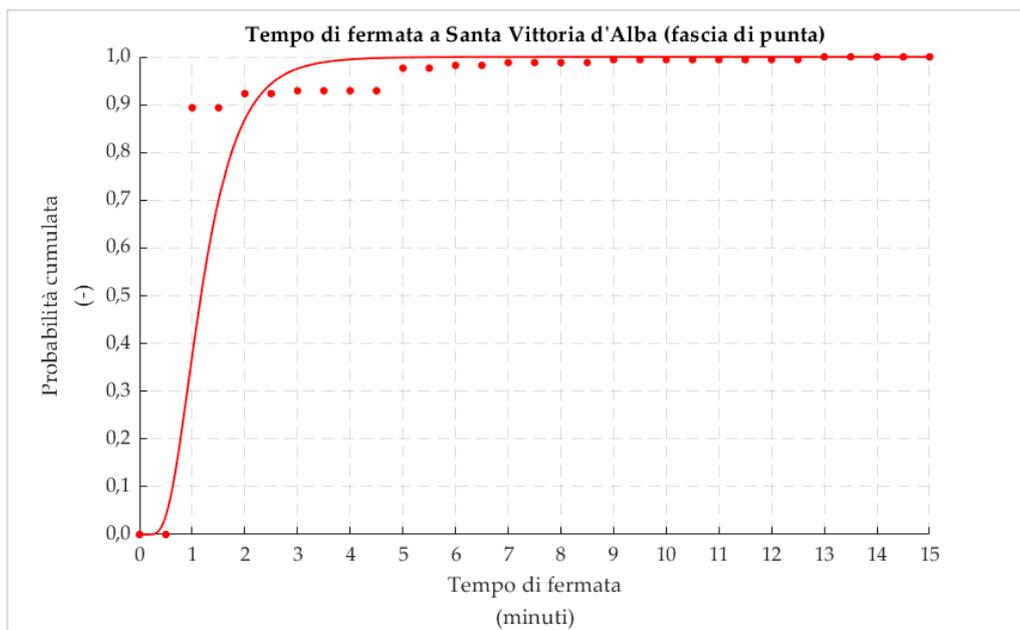


Figura 5.28 - CDF del tempo di fermata a Santa Vittoria d'Alba (fascia di punta)

La funzione densità di probabilità per la fascia di morbida risulta:

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot 0,1851 \cdot x} \cdot e^{-\frac{(\ln(x)-0,0134)^2}{2 \cdot 0,1851^2}} \quad (5.37)$$

La funzione densità di probabilità per la fascia di punta risulta:

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot 0,4803 \cdot x} \cdot e^{-\frac{(\ln(x)-0,1535)^2}{2 \cdot 0,4803^2}} \quad (5.38)$$

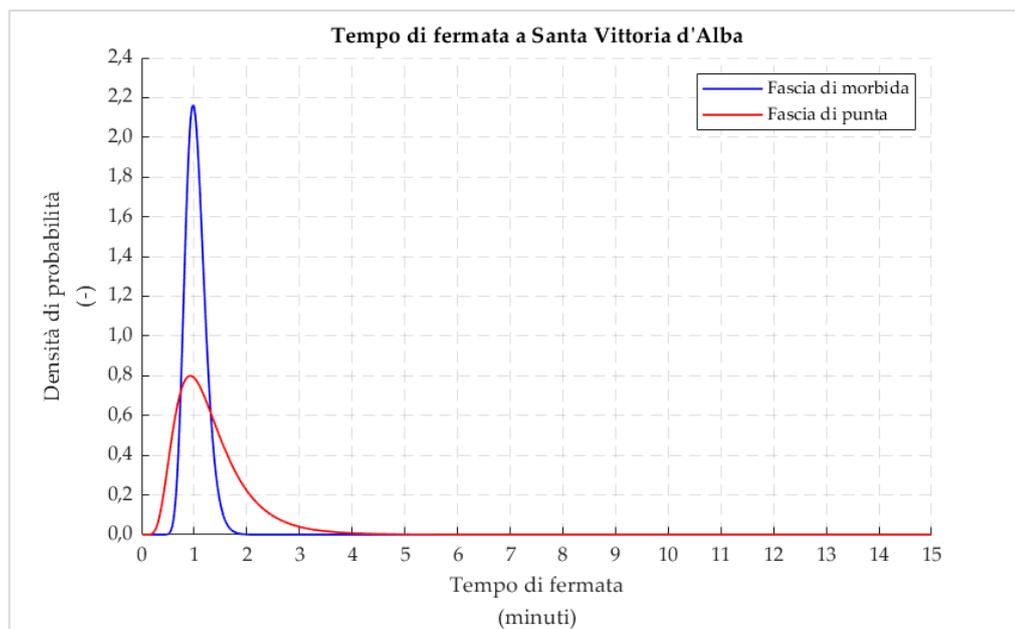


Figura 5.29 - Comparazione delle PDF del tempo di fermata a Santa Vittoria d'Alba

Nell'insieme si può osservare come le distribuzioni cambino tra fascia di morbida e di punta in tutte le località analizzate; si ricordi che la distribuzione lognormale è asimmetrica, pertanto moda e media non coincidono, e in tutti i casi nella fascia di punta si ha uno spostamento della moda verso intervalli di sosta maggiori (anche in quelli in cui non si ha un incremento della media).

Tale incremento non è dovuto unicamente a un maggiore numero di viaggiatori per determinate corse, con conseguente aumento dei tempi di imbarco, ma anche (nelle stazioni di Sommariva del Bosco e di Santa Vittoria d'Alba) alla necessità di effettuare ulteriori incroci a causa della presenza della coppia di rinforzo Torino Porta Nuova - Alba e viceversa.

Capitolo 6

Potenziamento dell'offerta di trasporto

Uno dei fini del presente studio è fornire un modello di esercizio che permetta un incremento dell'offerta di trasporto attualmente presente sulla relazione Torino - Alba. Come già presentato nel *paragrafo 1.1* l'analisi si articola su due possibili nuovi servizi: passaggio da un cadenzamento orario ad uno semi-orario per la linea 4 del Servizio Ferroviario Metropolitano (con prolungamento verso nord del percorso attuale sulla ferrovia Torino - Ceres) e inserimento di coppie di treni Regionali Veloci con percorso Torino Porta Nuova - Alba via Cavallermaggiore. Tali proposte sono da intendersi avanzate per i giorni feriali, ossia dal lunedì al sabato.

Si ricordi che il modello di esercizio attuale, presentato nel *paragrafo 4.2*, viene indicato come modello di esercizio A.

6.1 Modello di esercizio B

Il primo caso analizzato, indicato come **modello di esercizio B**, si concentra sull'aumento delle corse della linea SFM 4. Si ipotizza di prolungarne il percorso verso nord, per creare un collegamento che vada dalla zona delle Langhe e del Roero fino all'Aeroporto di Torino-Caselle, tramite il passante ferroviario di Torino, ed eventualmente prosegua verso le Valli di Lanzo. Lo studio della pianificazione delle corse qui si concentra sulla tratta Trofarello - Alba e, in termini di rete, il sistema considerato comprende la tratta Trofarello - Cavallermaggiore della ferrovia Torino - Fossano - Savona, la ferrovia Carmagnola - Bra e la tratta Cavallermaggiore - Alba della ferrovia Cavallermaggiore - Alessandria.

Questo modello di esercizio prevede l'istituzione di 33 corse dispari in direzione sud e altrettante corse pari in direzione nord, basandosi su una griglia di cadenzamento semi-orario rigorosa.

L'orario di partenza del primo treno dispari è richiesto tra le 06:00 e le 06:05 da Trofarello (le stazioni di Torino saranno servite nei 25 minuti precedenti), con arrivo atteso

ad Alba fra le 07:05 e le 07:10; l'ultima partenza alla sera è tra le 22:00 e le 22:05 da Trofarello, con arrivo ad Alba tra le 23:05 e le 23:10.

In direzione opposta, il primo treno pari parte da Alba tra le 05:40 e le 05:45, con arrivo atteso a Trofarello tra le 06:40 e le 06:45 (e nelle varie stazioni di Torino nei 25 minuti successivi); l'ultima partenza pianificata da Alba è compresa tra le 21:40 e le 21:45, con arrivo a Trofarello tra le 22:40 e le 22:45.

Tutti i treni, in entrambe le direzioni, tra le stazioni di Trofarello ed Alba, effettueranno le seguenti fermate intermedie:

- Villastellone;
- Carmagnola;
- Sommariva del Bosco;
- Sanfrè;
- Bandito;
- Bra;
- Pocapaglia;
- Santa Vittoria d'Alba;
- Monticello d'Alba;
- Mussotto.

Si prevede di utilizzare gli elettrotreni ETR.425, meglio conosciuti come "Jazz" a 5 elementi: per ciascuna corsa sono offerti 305 posti a sedere (di cui 2 per persone con disabilità motorie e circa 160 posti in piedi, per una capacità massima totale di circa 465 viaggiatori. Tale offerta permette dunque di trasportare fino a 930 passeggeri all'ora per direzione, per una capacità totale giornaliera di 15.345 viaggiatori per direzione.

È da considerarsi escluso, in quanto non più necessario, l'inserimento di coppie di rinforzo sulla relazione Torino Porta Nuova - Alba e viceversa.

Per permettere l'inserimento di queste tracce orario nel sistema considerato è necessario però imporre piccole variazioni d'orario ad altri treni circolanti sull'infrastruttura:

- traslazione fino a ± 5 minuti per i treni merci;
- traslazione fino a ± 3 minuti per i treni Regionali Veloci;
- traslazione fino a ± 2 minuti per i treni delle altre linee del SFM.

È necessario inoltre traslare di qualche minuto la attuale griglia di cadenzamento orario del SFM B Cavallermaggiore - Bra e viceversa, in modo tale da permettere ai passeggeri di effettuare coincidenza nella stazione di Bra con le corse della linea SFM 4.

Ulteriori verifiche dovranno essere eseguite nella costruzione dell'orario per il passante ferroviario di Torino e sulla ferrovia Torino - Ceres, argomento che esula dal presente lavoro di Tesi, per alternare adeguatamente i servizi delle linee SFM 3 e SFM 4, in modo tale da fornire corse ogni 15 minuti da e per l'Aeroporto di Torino-Caselle.

Dal momento che viene effettuata un'analisi probabilistica del tempo speso alle soste (vedere *paragrafo 5.4*) e si osserva come per alcune località il tempo assegnato di 60 secondi potrebbe non essere sufficiente ad evitare l'insorgenza di ritardi primari, si decide di realizzare anche delle simulazioni che prevedano, ove necessario, un allungamento del tempo di fermata da 60 a 120 secondi.

6.2 Modello di esercizio C

Si considera ora la possibilità di mantenere il servizio offerto dal SFM 4 in linea con le corse attuali, introducendo però una griglia rigorosa di cadenzamento orario e rimuovendo l'attuale coppia di rinforzo. Il percorso verrebbe comunque prolungato sulla ferrovia Torino - Ceres, ma per garantire collegamenti ogni 15 minuti dall'Aeroporto di Torino-Caselle sarà necessario prolungare su tale via anche la linea SFM 7 (con cadenzamento orario) oltre alla linea SFM 3 (con cadenzamento semi-orario), come peraltro già ipotizzato a maggio 2019 dall'Agenzia della Mobilità Piemontese.

Ai fini del potenziamento dei collegamenti sulla direttrice Torino - Alba viene istituita una nuova relazione di treni Regionali Veloci istradati via Cavallermaggiore, in modo tale da fornire spostamenti più veloci per i pendolari dei centri abitati più grandi.

Il **modello di esercizio C** prevede l'istituzione di 17 corse SFM 4 dispari in direzione sud e altrettante corse pari in direzione nord, con frequenza dei passaggi pari a 60 minuti.

L'orario di partenza del primo treno SFM 4 dispari è richiesto tra le 06:20 e le 06:25 da Trofarello (le stazioni di Torino saranno servite nei 25 minuti precedenti), con arrivo

atteso ad Alba fra le 07:20 e le 07:25; l'ultima partenza alla sera è tra le 22:20 e le 22:25 da Trofarello, con arrivo ad Alba tra le 23:20 e le 23:25.

In direzione opposta, il primo treno SFM 4 pari parte da Alba tra le 05:30 e le 05:35, con arrivo atteso a Trofarello tra le 06:30 e le 06:35 (e nelle varie stazioni di Torino nei 25 minuti successivi); l'ultima partenza pianificata da Alba è compresa tra le 21:30 e le 21:35, con arrivo a Trofarello tra le 22:30 e le 22:35.

Tutti questi treni, in entrambe le direzioni, tra le stazioni di Trofarello ed Alba, effettueranno le medesime fermate intermedie previste nel modello di esercizio B (vedere *paragrafo 6.1*).

È prevista inoltre l'istituzione di 16 corse di treni Regionali Veloci dispari in direzione sud e altrettante corse pari in direzione nord, con frequenza dei passaggi pari a 60 minuti: tali convogli espleteranno la relazione Torino Porta Nuova - Alba via Cavallermaggiore e viceversa. Questi treni, in entrambe le direzioni, oltre a servire le stazioni di Torino Porta Nuova e Torino Lingotto, effettueranno sosta per servizio passeggeri solo nelle stazioni di Carmagnola, Cavallermaggiore, Bra ed Alba. Tra Torino e Cavallermaggiore essi dovranno avere una griglia di cadenzamento che riprenda quella dei RV da/per Cuneo o Savona/Ventimiglia. L'obiettivo è infatti inserire le nuove corse con 30 minuti di distanza temporale con questi ultimi, in modo tale da creare un cadenzamento semi-orario nella tratta comune.

Pertanto, l'orario di transito del primo treno RV dispari è richiesto tra le 06:05 e le 06:10 a Trofarello (15 minuti dopo la partenza da Torino Porta Nuova), con arrivo atteso ad Alba fra le 06:50 e le 06:55; l'ultima corsa serale ha l'arrivo ad Alba tra le 21:55 e le 22:00.

In direzione opposta, il primo Regionale Veloce pari parte da Alba tra le 05:55 e le 06:00, con transito atteso a Trofarello tra le 06:40 e le 06:45; l'ultima partenza pianificata da Alba è compresa tra le 20:55 e le 21:00.

Si prevede di utilizzare per entrambi i servizi sempre gli elettrotreni ETR.425, le cui caratteristiche di capienza sono state presentate nel *paragrafo 6.1*. Giornalmente sono offerti 7.905 posti (di cui 5.185 a sedere) per direzione sulla linea SFM 4 e 7.440 posti (di cui 4.880 a sedere) per direzione sui nuovi collegamenti RV.

È da considerarsi escluso, in quanto non più necessario, l'inserimento di coppie di rinforzo della linea SFM 4 sulla relazione Torino Porta Nuova - Alba (via Sommariva del Bosco) e viceversa.

Per permettere l'inserimento di queste tracce orario nel sistema considerato è necessario imporre le seguenti variazioni d'orario, seppur contenute, ad altri treni circolanti sull'infrastruttura:

- traslazione fino a ± 15 minuti per i treni merci e per le locomotive isolate;
- traslazione fino a ± 2 minuti per i treni Regionali Veloci;
- traslazione fino a ± 2 minuti per i treni delle altre linee del SFM;
- traslazione fino a ± 1 minuto per i treni InterCity.

Per quanto riguarda il SFM B, si mantiene il numero di corse attuali compatibilmente con l'occupazione della linea Cavallermaggiore - Bra da parte dei RV Torino Porta Nuova - Alba di nuova istituzione, aventi un forte vincolo d'orario.

Ulteriori verifiche dovranno essere eseguite nella costruzione dell'orario per il passante ferroviario di Torino e sulla ferrovia Torino - Ceres, argomento che esula dal presente lavoro di Tesi, per alternare adeguatamente i servizi delle linee SFM 3, SFM 4 e SFM 7, in modo tale da fornire corse ogni 15 minuti da e per l'Aeroporto di Torino-Caselle.

Anche per questo modello di esercizio, si decide di realizzare delle simulazioni aggiuntive che prevedano, ove necessario, un allungamento del tempo di fermata da 60 a 120 secondi.

6.3 Modello di esercizio D

Un'ulteriore ipotesi di potenziamento sarebbe quella di introdurre tutte le corse aggiunte nei modelli di esercizio B e C rispetto allo scenario attuale, con tutti i relativi vincoli già esposti.

L'offerta giornaliera sarebbe così composta:

- 33 coppie di corse per direzione sulla linea SFM 4, dalle Valli di Lanzo/Aeroporto di Torino-Caselle fino ad Alba (via passante ferroviario di Torino, Sommariva del Bosco), con cadenzamento semi-orario;
- 16 coppie di Regionali Veloci Torino Porta Nuova - Alba (via Cavallermaggiore), con cadenzamento orario.

Tale modello è indicato come **modello di esercizio D**.

Capitolo 7

Interventi infrastrutturali necessari

Come si è già accennato nei capitoli precedenti, il presente lavoro di Tesi è un'analisi multi-scenario a più livelli, che non contempla solo lo studio di più modelli di esercizio, per approfondire i possibili potenziamenti dell'offerta di trasporto, ma anche di differenti scenari infrastrutturali. In particolare, vengono definiti, per ciascun modello di esercizio creato, gli interventi necessari oppure raccomandabili al fine della sua fattibilità o per il miglioramento dei tempi di percorrenza o della stabilità e/o robustezza d'orario.

7.1 Possibili interventi: localizzazione ed effetti previsti

A partire dallo stato infrastrutturale attuale, ossia lo scenario infrastrutturale 0, è possibile effettuare degli interventi di *upgrade* di vario genere, con diversi effetti sull'esercizio ma aventi anche differente dispendio economico.

Un primo intervento ipotizzato riguarda l'abilitazione delle stazioni di Sommariva del Bosco e di Santa Vittoria d'Alba ai **movimenti contemporanei dei treni**: sono rispettati i vincoli circa la presenza del Sistema di Controllo della Marcia del Treno e di pendenza massima della linea nel tratto di arrivo in stazione, ma non le distanze minime richieste per i segnali di partenza nei confronti dei punti di convergenza degli itinerari, né sono presenti i sottopassaggi. Si è indagata, tramite le immagini satellitari e le fotografie eseguite in campo, la disponibilità degli spazi nelle stazioni suddette per adottare le modifiche necessarie.

Per la **stazione di Sommariva del Bosco** è stato previsto lo smantellamento degli attuali binari (binario 1 in deviata con deviatoi a 60 km/h, binario 2 di corretto tracciato, ex-binario 3 dismesso) e marciapiedi (uno a servizio del binario 1 e uno posto fra i due binari). È stata pianificata la posa di due nuovi binari (binario 1 di corretto tracciato e binario 2 in deviata con deviatoi a 60 km/h), che siano dotati di marciapiedi (posti esternamente ai due binari, ciascuno a servizio di uno di questi), di altezza conforme agli standard europei, dotati di sottopassaggio ed attrezzati per l'accessibilità a persone a mobilità ridotta (tramite scivoli o ascensori). I segnali di partenza sono stati posti a 100 metri dal punto di convergenza degli itinerari lato Carmagnola e a 50 metri, con inserimento di un tronchino d'indipendenza, lato Bra.



Figura 7.1 - Piazzale binari della stazione di Sommariva del Bosco

Per la **stazione di Santa Vittoria d'Alba** è stato previsto invece pressoché il mantenimento dell'attuale schema di stazione, con spostamento dei segnali di partenza ad una distanza di 100 metri dai punti di convergenza degli itinerari sia lato Bra che lato Alba e sostituzione degli attuali deviatori a 30 km/h con quelli che permettano una velocità in deviata di 60 km/h. Interventi più rilevanti sono necessari riguardo l'accesso ai binari per i viaggiatori: attualmente vi è un marciapiede a servizio del binario 1 e un altro, di dimensioni ridotte (ben visibile in *Figura 7.2*) posto fra i binari 1 e 2. Dal momento che gli spazi disponibili sono ristretti, essendo tale stazione costruita a mezza costa, non risulta conveniente costruire un marciapiede con accesso al sottopassaggio al di là del binario 2, per presenza di un acclive pendio in terra, ma creare un unico marciapiede centrale a servizio dei due binari, ricavando lo spazio fra i due binari tramite la rimozione dell'attuale marciapiede del binario 1 e lo spostamento del binario stesso verso il fabbricato viaggiatori (oggi dismesso). Si avrebbe così un marciapiede conforme agli standard europei, dotato di sottopassaggio che porti direttamente al di fuori della stazione ed attrezzato per l'accessibilità a persone a mobilità ridotta. Tale soluzione progettuale, seppure molto rara, è stata già utilizzata in stazioni con due soli

binari, in caso di spazi molto ristretti per motivi orografici (ad esempio a Vernazza, nelle Cinque Terre, in provincia della Spezia in Liguria).



Figura 7.2 - Stazione di Santa Vittoria d'Alba

Così facendo si ridurrebbe il tempo necessario per effettuare l'incrocio in stazione o comunque, qualora questo non si possa ridurre per motivi di tempi di percorrenza, si avrebbe un risparmio di tempo nel caso in cui uno dei due convogli fosse in leggero ritardo, evitando di farlo fermare al segnale di protezione della stazione, con ulteriore perdita di tempo. Inoltre, avere stazioni dotate di marciapiedi con altezza pari a 55 cm e sottopassaggi per evitare l'attraversamento dei binari, è molto rilevante per l'accesso al treno da parte dei viaggiatori e la loro incolumità.

Tale intervento viene proposto anche per la **stazione di Alba**, ove, essendo stazione capolinea e non essendo al momento previsti ingressi in contemporanea (il servizio passeggeri è sospeso sulla linea Alba - Castagnole delle Lanze), lo scopo principale sarebbe momentaneamente quello di garantire la sicurezza dei passeggeri grazie alla costruzione dei sottopassaggi. Lo schema dei binari rimarrebbe il medesimo, ma risulta necessario lo spostamento dei segnali di partenza (lato Castagnole delle Lanze) a 100 metri dal punto di convergenza degli itinerari.

Un ulteriore intervento è l'**elettificazione della linea Cavallermaggiore - Bra**. Infatti, ai fini dell'istituzione delle nuove corse Regionali Veloci Torino Porta Nuova - Alba istradate via Cavallermaggiore, è necessario permettere la percorribilità al materiale rotabile a trazione elettrica del tratto Cavallermaggiore - Bra della ferrovia Cavallermaggiore - Alessandria. Ad oggi tale sezione non è elettrificata, pertanto andrebbe posata la linea aerea e installati tutti gli impianti elettrici atti all'alimentazione dei treni in corrente continua a 3000 volt.

Per l'inserimento di tali treni Regionali Veloci è inoltre opportuno eseguire una **modifica allo schema dei deviatori** in radice nord **della stazione di Cavallermaggiore**, per permettere l'ingresso di un treno proveniente da Torino in contemporanea alla partenza di un treno che ha origine ad Alba. Si è pianificato di utilizzare il binario 5 per i RV da Torino ad Alba e il 4 per quelli diretti in direzione opposta. Vengono inserite due nuove comunicazioni, rispettivamente tra il binario 2 e il 3 e tra il binario 3 e il 4. Inoltre vengono riposizionati alcuni segnali di partenza sia per garantire le distanze minime richieste dai punti di convergenza degli itinerari per permettere i movimenti contemporanei dei treni, sia per permettere l'eventuale uso del binario 4 ai treni diretti verso Bra / Alba, oggi non possibile.

Proseguendo verso nord sul tratto della linea Torino - Fossano - Savona oggetto di interesse, si prevede anche la **riattivazione del binario 3 nella stazione di Racconigi**. Attualmente è presente l'armamento ma è rimasta la comunicazione con il binario 2 solo lato Torino, mentre è stata smantellata quella lato Savona. Risultano smantellati anche i segnali di partenza e la linea aerea a servizio del binario stesso. L'importanza di tale binario consiste nel permettere di eseguire delle precedenze: nel dettaglio, ha una lunghezza che permette di ospitare anche treni merci con modulo di 750 m (obiettivo fissato dall'Unione Europea come lunghezza ideale di tali convogli), caratteristica difficilmente riscontrabile in altre stazioni della medesima linea attualmente.

Per quanto riguarda invece la **stazione di Trofarello**, viene proposta la **realizzazione di una coppia di comunicazioni semplici** in radice sud, con deviatori percorribili a 100 km/h, che forniscano la possibilità di un istradamento veloce in linea Genova ai convogli

provenienti dalla linea Torino - Fossano - Savona. Attualmente tale itinerario viene effettuato mediante una coppia di comunicazioni semplici poste in radice nord della medesima stazione, dotate di deviatori percorribili a 60 km/h. Il vantaggio della nuova installazione sarebbe duplice: sia una minore riduzione di velocità, che in tale tratto risulta compresa tra 120 km/h e 130 km/h (dipendentemente dal rango del materiale rotabile), con minore allungamento dei tempi di percorrenza, sia la possibilità di non impegnare nella stazione di Trofarello, da parte dei treni in transito da/per Cuneo o Savona/Ventimiglia, i binari di corretto tracciato della linea Savona, usualmente utilizzati per il servizio passeggeri delle linee del Servizio Ferroviario Metropolitano. Per minimizzare ulteriormente le interferenze tra gli itinerari della linea Genova e della linea Savona si potrebbe inoltre optare per un collegamento a “salto di montone” anziché delle normali comunicazioni a raso, vista la disponibilità di spazi.

Si è studiata anche la possibilità di **umentare i punti di incrocio** dei treni sui tratti a binario semplice, trasformando alcune fermate (dotate di un unico binario) in stazioni (con due binari).

Sulla ferrovia Carmagnola - Bra, in base agli spazi disponibili, l'unica possibilità è data dalla trasformazione della **fermata di Sanfrè** (già mostrata in *Figura 4.7*) in stazione, con due binari entrambi serviti da marciapiedi e dotati di sottopassaggio con possibilità di accesso alle persone a mobilità ridotta. Il binario 1 rimarrebbe quello di corretto tracciato e il 2 sarebbe in deviata, dotato di deviatori a 60 km/h. È previsto l'inserimento di tronchini d'indipendenza ad ambo le estremità del secondo binario per ridurre lo spazio minimo necessario dopo il segnale di partenza, ai fini della possibilità di effettuare movimenti contemporanei. Essendo una ex-stazione oggi declassata a fermata non vi è alcun problema di spazi dato che non ci sono abitazioni nelle immediate vicinanze dei binari. Il vantaggio atteso è dato dalla possibilità di spostare il punto di incrocio, localizzato a Sommariva del Bosco o a Bra, in caso di ritardo di un treno.

Sul tratto Bra - Alba la disponibilità di spazi è assai ridotta a causa della localizzazione delle fermate. La soluzione analoga a quella adottata per la fermata di Sanfrè può essere adottata solo per la **fermata di Monticello d'Alba** (mostrata in *Figura 7.3*), anch'essa oggi una ex-stazione declassata e dotata di un solo binario.



Figura 7.3 - Ex-stazione (oggi fermata) di Monticello d'Alba

Invece, per la **fermata di Pocapaglia** e la **fermata di Mussotto** (anche questa ex-stazione oggi declassata a Fermata) l'unica possibilità è data dalla trasformazione in stazioni dotate di due binari, di cui uno solo (quello già presente) dotato di marciapiedi e dedicato al servizio passeggeri. Il secondo binario permetterebbe così il transito di Regionali Veloci che non fermino nelle suddette località, o di convogli per invio materiale, o di eventuali treni merci e/o locomotive isolate (ad oggi però non pianificati in orario). Limitandosi alla possibilità di effettuare incroci tra un treno in transito ed uno che effettua sosta per servizio passeggeri si abbattano enormemente costi, tempi e difficoltà di realizzazione dell'intervento, dal momento non risulta necessario costruire sottopassaggi. Al termine di tali lavori, in ciascuna delle due fermate, il binario 2 (non servito da marciapiede) sarebbe quello di corretto tracciato e il binario 1 (atto al servizio passeggeri) in deviata, dotato di deviatori compatibili con una velocità di 60 km/h.



Figura 7.4 - Fermata di Pocapaglia



Figura 7.5 - Ex-stazione (oggi fermata) di Mussotto

7.2 Interventi richiesti per modello di esercizio B

Per la trasformazione della linea 4 del Servizio Ferroviario Metropolitano in un servizio con cadenzamento semi-orario vengono valutati diversi scenari infrastrutturali. Oltre alla fattibilità senza alcuna modifica infrastrutturale rispetto allo stato dell'arte (**scenario infrastrutturale 0**), si propone la costruzione del medesimo modello di esercizio con l'abilitazione delle stazioni di Sommariva del Bosco, di Santa Vittoria d'Alba e di Alba ai movimenti contemporanei dei treni (**scenario infrastrutturale 1**); infine, a tali modifiche si aggiunge la trasformazione della fermata di Sanfrè in stazione, aggiungendo così un punto di incrocio (**scenario infrastrutturale 2**).

Per ciascuno di questi scenari si costruiscono le griglie di cadenzamento e si comparano i tempi di percorrenza. Per il tratto Torino Porta Susa - Trofarello, esterno al sistema simulato, si adotta una percorrenza pari a 16 minuti, uguale a quella assegnata attualmente alle tracce commerciali del SFM 4.

Si riportano di seguito i tempi di percorrenza più rilevanti, ossia quelli fra la città di Torino e i maggiori centri serviti dal SFM 4 (intervalli da intendersi da partenza dalla prima stazione ad arrivo nella seconda stazione).

Tabella 7.1 - Modello di esercizio B, SFM 4: tempi di percorrenza di riferimento

Tratta	Tempo di percorrenza simulato		
	Scenario infrastrutturale 0	Scenario infrastrutturale 1	Scenario infrastrutturale 2
Torino Porta Susa → Bra	53 minuti	52 minuti	51 minuti
Torino Porta Susa → Alba	1 ora e 22 minuti	1 ora e 21 minuti	1 ora e 21 minuti
Bra → Torino Porta Susa	49 minuti	47 minuti	47 minuti
Alba → Torino Porta Susa	1 ora e 21 minuti	1 ora e 19 minuti	1 ora e 19 minuti

In *Tabella 7.2* viene riportata la prima traccia orario della giornata (per ogni scenario infrastrutturale) in direzione sud e in *Tabella 7.3* quella relativa alla direzione nord, relativamente alle tratte oggetto di studio, ossia Trofarello - Alba e viceversa.

Tabella 7.2 - Modello di esercizio B, SFM 4: prima traccia orario dispari della giornata

Tratta	Orario (hh:mm)		
	Scenario infrastrutturale 0	Scenario infrastrutturale 1	Scenario infrastrutturale 2
Trofarello (A)	06:01	06:02	06:02
Trofarello (P)	06:02	06:03	06:03
Villastellone (A)	06:06	06:07	06:07
Villastellone (P)	06:07	06:08	06:08
Carmagnola (A)	06:13	06:14	06:14
Carmagnola (P)	06:14	06:15	06:15
Sommariva del Bosco (A)	06:21	06:22	06:22
Sommariva del Bosco (P)	06:25	06:25	06:23
Sanfrè (P)	06:28	06:28	06:26
Sanfrè (A)	06:29	06:29	06:28
Bandito (A)	06:32	06:32	06:31
Bandito (P)	06:33	06:33	06:32
Bra (A)	06:39	06:39	06:38
Bra (P)	06:42	06:43	06:41
Pocapaglia (A)	06:47	06:48	06:46
Pocapaglia (P)	06:48	06:49	06:47
Santa Vittoria d'Alba (A)	06:51	06:52	06:50
Santa Vittoria d'Alba (P)	06:54	06:54	06:54
Monticello d'Alba (A)	06:58	06:58	06:58
Monticello d'Alba (P)	06:59	06:59	06:59
Mussotto (A)	07:03	07:03	07:03
Mussotto (P)	07:04	07:04	07:04
Alba (A)	07:07	07:07	07:07

Tabella 7.3 - Modello di esercizio B, SFM 4: prima traccia orario pari della giornata

Tratta	Orario (hh:mm)		
	Scenario infrastrutturale 0	Scenario infrastrutturale 1	Scenario infrastrutturale 2
Alba (P)	05:41	05:41	05:41
Mussotto (A)	05:44	05:44	05:44
Mussotto (P)	05:45	05:45	05:45
Monticello d'Alba (A)	05:49	05:49	05:49
Monticello d'Alba (P)	05:50	05:50	05:50
Santa Vittoria d'Alba (A)	05:54	05:54	05:54
Santa Vittoria d'Alba (P)	05:57	05:55	05:55
Pocapaglia (A)	06:01	05:59	05:59
Pocapaglia (P)	06:02	06:00	06:00
Bra (A)	06:09	06:07	06:07
Bra (P)	06:13	06:09	06:09
Bandito (A)	06:17	06:12	06:12
Bandito (P)	06:18	06:13	06:13
Sanfrè (P)	06:21	06:16	06:16
Sanfrè (A)	06:22	06:17	06:17
Sommariva del Bosco (A)	06:25	06:20	06:20
Sommariva del Bosco (P)	06:26	06:24	06:24
Carmagnola (A)	06:33	06:31	06:31
Carmagnola (P)	06:34	06:32	06:32
Villastellone (A)	06:39	06:37	06:37
Villastellone (P)	06:40	06:38	06:38
Trofarello (A)	06:45	06:43	06:43
Trofarello (P)	06:46	06:44	06:44

All'interno delle griglie di cadenzamento rigorose le corse vengono ripetute, senza alcun cambiamento, ogni 30 minuti. Sono state pianificate 33 coppie di corse, pertanto le ultime partenze della giornata si hanno 16 ore dopo le prime.

Andando al di là del semplice punto di vista deterministico, si valutano gli eventuali aspetti positivi degli interventi infrastrutturali sull'esercizio in presenza di perturbazioni d'orario. In *Figura 7.6* e in *Figura 7.7* si analizza l'evoluzione del ritardo medio delle corse, ottenuto tramite le simulazioni, lungo il percorso effettuato (andata e ritorno).

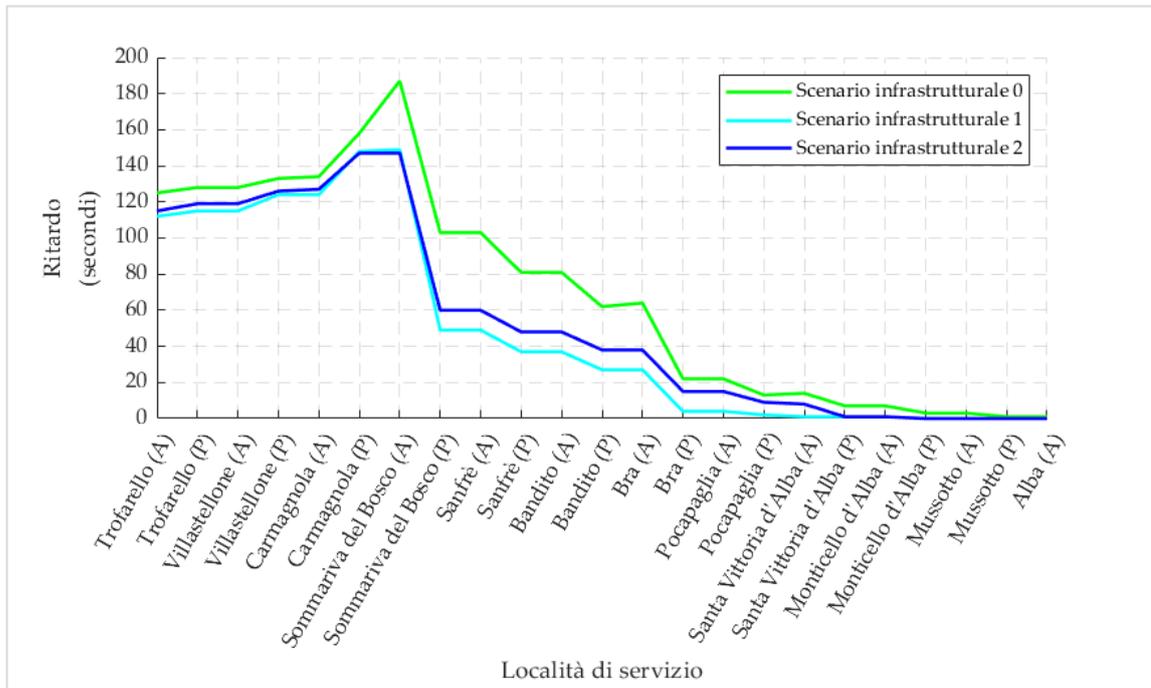


Figura 7.6 - Modello di esercizio B, SFM 4: evoluzione del ritardo medio in corsa (corse dispari)

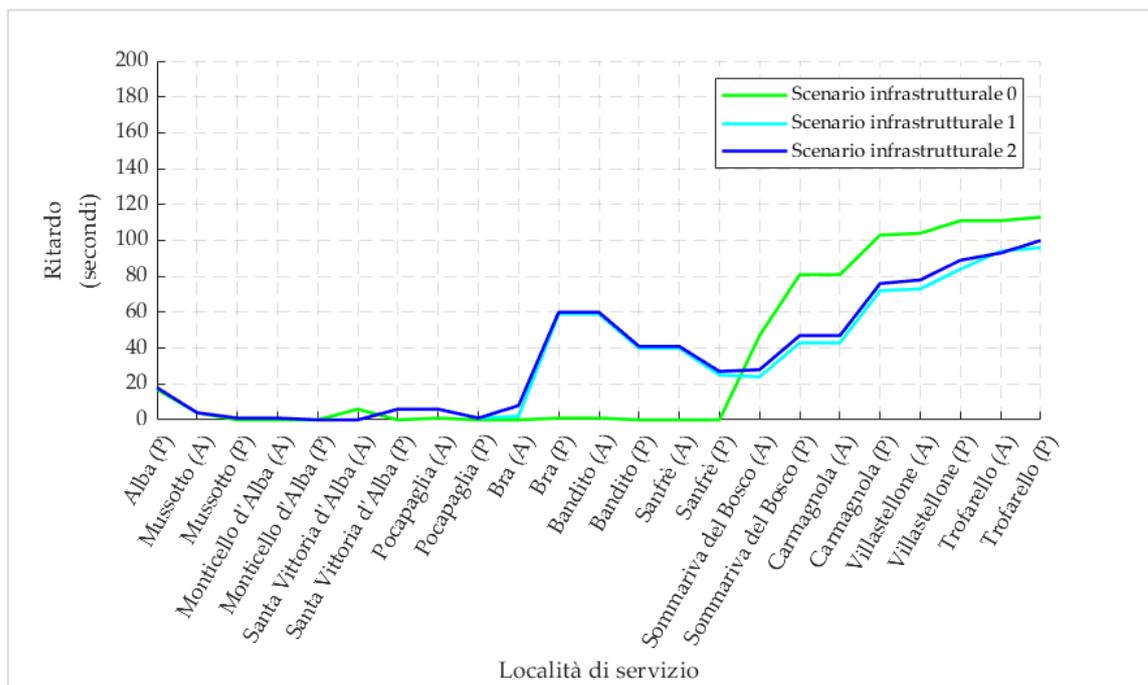


Figura 7.7 - Modello di esercizio B, SFM 4: evoluzione del ritardo medio in corsa (corse pari)

A partire da tali grafici si osserva come l'abilitazione ai movimenti contemporanei generi una riduzione, seppur lieve, dei ritardi: nel caso in cui questi non siano possibili se il treno il cui ingresso è pianificato per primo nella stazione si presentasse con lieve ritardo, arriverebbe in contemporanea al treno incrociante, pertanto uno dei due sarebbe costretto ad attendere al segnale di protezione della stazione, diversamente da quanto pianificato. Osservando il grafico in *Figura 7.7* si nota come nella stazione di Bra (già abilitata alla contemporaneità dei movimenti) negli scenari 1 e 2 si crei un ritardo non presente nello scenario 0: ciò è causato da un minore tempo di fermata schedulato nella stazione, pertanto il ritardo del treno incrociante viene più facilmente propagato in direzione opposta. Ciò non è da ritenersi preoccupante, dal momento nelle stazioni successive il ritardo diventa inferiore rispetto allo scenario attuale. Si può osservare come, in generale, in presenza di stazioni non abilitate ai movimenti contemporanei, il ritardo aumenti all'arrivo in tali località. L'evoluzione del ritardo negli scenari infrastrutturali 1 e 2 è pressoché identica poiché non viene effettuato alcun incrocio nella stazione di Sanfrè: i vantaggi di questo *upgrade* infrastrutturale sorgerebbero in caso di ritardi più marcati (tra i 5 e i 10 minuti) in cui risulterebbe conveniente spostare il punto di incrocio dei treni.

In ogni caso, comunque, i ritardi risultano contenuti; ai fini della regolarità della circolazione nella rete, il ritardo più influente è quello all'entrata nel nodo di Torino, ossia in partenza da Trofarello, affinché le corse non perdano le loro tracce orario (da Trofarello verso Torino si ha una concentrazione di corse molto più elevata che nel resto della rete studiata; inoltre, procedendo verso Torino, il nodo diventa ancor più trafficato a partire dalla stazione successiva, quella di Moncalieri, per l'inserimento delle corse della linea SFM 2 Chivasso - Pinerolo).

Buona parte del ritardo viene assorbita nelle stazioni di incrocio, ove è previsto un tempo di fermata maggiore dei consueti 60 secondi. Tuttavia, in alcune stazioni, in primis Trofarello e Carmagnola, si osserva come il minuto di fermata pianificato non sia sufficiente a permettere la discesa e la salita dei passeggeri. Si decide allora di aumentare il tempo di fermata, per la suddetta coppia di stazioni, a 120 secondi e valutarne gli effetti in termini di evoluzione del ritardo. Tale valutazione viene effettuata sullo scenario infrastrutturale 1, ritenuto il più adatto per l'espletamento del modello di esercizio B.

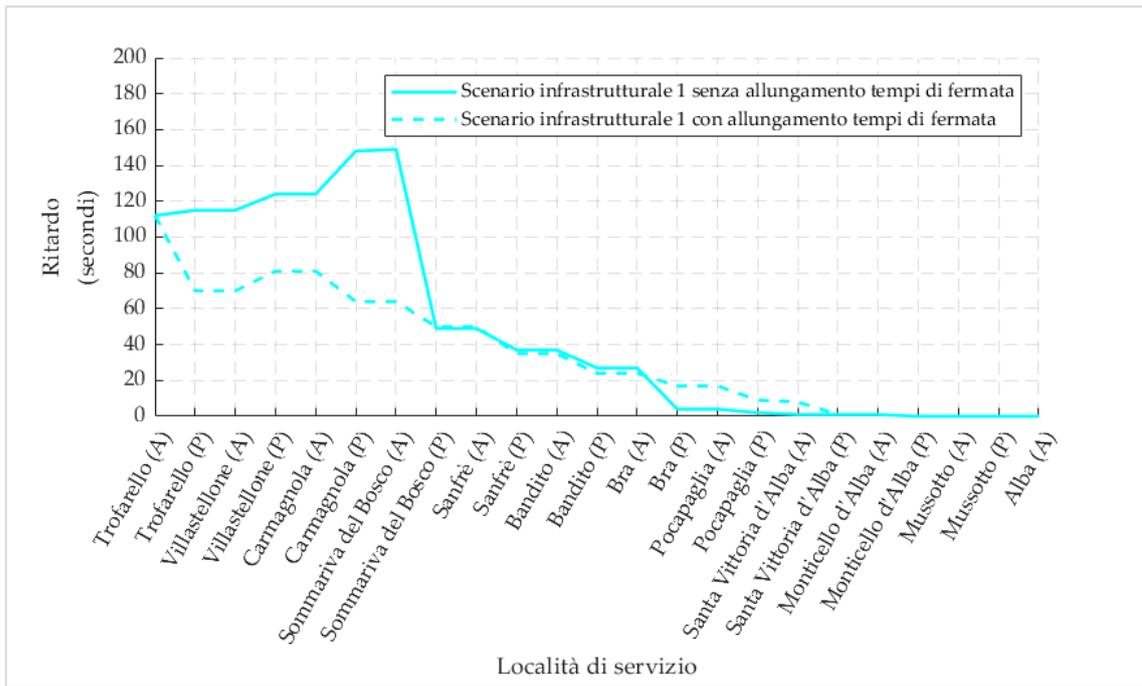


Figura 7.8 - Modello di esercizio B, SFM 4: evoluzione del ritardo medio in corsa (corsa dispari)

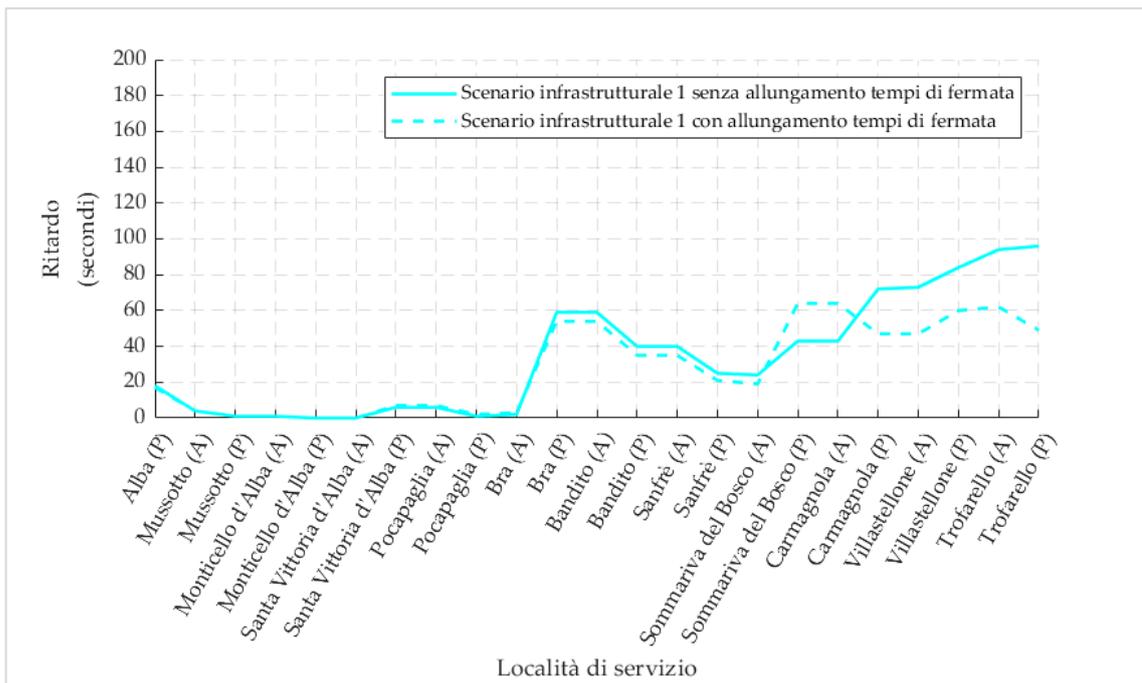


Figura 7.9 - Modello di esercizio B, SFM 4: evoluzione del ritardo medio in corsa (corsa pari)

Si osserva come gli effetti degli allungamenti dei tempi di fermata a Trofarello e Carmagnola, per entrambe le direzioni, presentino una diminuzione del ritardo molto modesta: a fronte di un allungamento totale di 2 minuti, in direzione sud il vantaggio ottenuto si esaurisce nella stazione di Sommariva del Bosco, ove viene effettuato un

incrocio, mentre in direzione nord la diminuzione è trascurabile, in quanto nell'ordine di 50 secondi. Pertanto, tale soluzione non viene ritenuta necessaria; ciò è confermato dal fatto che all'interno della simulazione al treno non viene permesso di arrivare in anticipo, cosa che invece può accadere nella realtà (anche frequentemente se si tratta di lievi anticipi): per l'incarozzamento si avrebbe già un più largo intervallo di tempo, non modellizzabile nel simulatore.

Pertanto, alla luce di quanto descritto, lo scenario infrastrutturale 1 può essere assunto come ideale per l'applicazione del modello di esercizio B.

Tabella 7.4 - Modello di esercizio B, SFM 4: comparazione degli scenari infrastrutturali

Parametro di confronto	Scenario infrastrutturale 1 vs Scenario infrastrutturale 0	Scenario infrastrutturale 1 vs Scenario infrastrutturale 2
Tempo di viaggio totale Trofarello - Alba	- 1 minuto	Nessuna differenza
Tempo di viaggio totale Alba - Trofarello	- 2 minuti	Nessuna differenza
Ritardo medio in entrata nel nodo di Torino	- 17 secondi	- 4 secondi
Ritardo medio lungo il percorso Trofarello - Alba	- 20 secondi	- 5 secondi
Ritardo medio lungo il percorso Alba - Trofarello	Nessuna differenza	- 2 secondi

Si noti che le differenze con lo scenario infrastrutturale 2 sono trascurabili, tuttavia la trasformazione della fermata di Sanfrè in stazione potrebbe essere utile in caso di ritardi più marcati, sebbene questo comporti un rilevante aumento dei costi delle modifiche infrastrutturali.

7.3 Interventi richiesti per modello di esercizio C

In questo caso si valuta il mantenimento di un cadenzamento orario per la linea 4 del Servizio Ferroviario Metropolitano e l'aggiunta di Regionali Veloci Torino Porta Nuova - Alba via Cavallermaggiore e viceversa. Se ne valuta la fattibilità senza interventi sul percorso Bra - Alba, ossia realizzando solamente l'elettrificazione del tratto Cavallermaggiore - Bra e gli interventi nelle stazioni di Cavallermaggiore, Racconigi e Trofarello (**scenario infrastrutturale 3**); successivamente si propone la costruzione dello stesso modello di esercizio con l'aggiunta dell'abilitazione delle stazioni di Santa Vittoria d'Alba e di Alba ai movimenti contemporanei dei treni (in questo caso Sommariva del Bosco è marginale, non essendo previsti incroci - **scenario infrastrutturale 4**).

Per entrambi gli scenari si costruiscono le griglie di cadenzamento e si comparano i tempi di percorrenza. Per i tratti Torino Porta Susa - Trofarello e Torino Porta Nuova - Trofarello, esterni al sistema simulato, si adottano percorrenze rispettivamente pari a 16 e 15 minuti, uguali a quelle assegnate attualmente alle tracce commerciali della linea 4 del Servizio Ferroviario Metropolitano e dei Regionali Veloci da/per Cuneo o Savona/Ventimiglia.

Si riportano di seguito i tempi di percorrenza di riferimento, dunque quelli fra la città di Torino e le stazioni di Bra ed Alba (intervalli da intendersi da partenza dalla prima stazione ad arrivo nella seconda stazione).

Tabella 7.5 - Modello di esercizio C, SFM 4: tempi di percorrenza di riferimento

Tratta	Tempo di percorrenza simulato	
	Scenario infrastrutturale 3	Scenario infrastrutturale 4
Torino Porta Susa → Bra	51 minuti	51 minuti
Torino Porta Susa → Alba	1 ora e 18 minuti	1 ora e 18 minuti
Bra → Torino Porta Susa	49 minuti	49 minuti
Alba → Torino Porta Susa	1 ora e 22 minuti	1 ora e 21 minuti

Tabella 7.6 - Modello di esercizio C, RV: tempi di percorrenza di riferimento

Tratta	Tempo di percorrenza simulato	
	Scenario infrastrutturale 3	Scenario infrastrutturale 4
Torino Porta Nuova → Bra	44 minuti	44 minuti
Torino Porta Nuova → Alba	1 ora e 1 minuto	1 ora e 1 minuto
Bra → Torino Porta Nuova	43 minuti	43 minuti
Alba → Torino Porta Nuova	1 ora e 1 minuto	1 ora e 1 minuto

Nelle tabelle seguenti vengono riportate le prime tracce orario della giornata (per ogni scenario infrastrutturale, sia per la linea SFM 4 che per i Regionali Veloci) in direzione sud e subito di seguito per la direzione nord, relativamente alle tratte oggetto di studio, ossia Trofarello - Alba (via Sommariva del Bosco o via Cavallermaggiore) e viceversa. Le stazioni ove è previsto il semplice transito, senza che venga effettuato servizio passeggeri, sono riportate in corsivo.

Tabella 7.7 - Modello di esercizio C, SFM 4: prima traccia orario dispari della giornata

Tratta	Orario (hh:mm)	
	Scenario infrastrutturale 3	Scenario infrastrutturale 4
Trofarello (A)	06:19	06:19
Trofarello (P)	06:20	06:20
Villastellone (A)	06:24	06:24
Villastellone (P)	06:25	06:25
Carmagnola (A)	06:31	06:31
Carmagnola (P)	06:32	06:32
Sommariva del Bosco (A)	06:39	06:39
Sommariva del Bosco (P)	06:40	06:40
Sanfrè (P)	06:43	06:43
Sanfrè (A)	06:44	06:44
Bandito (A)	06:47	06:47
Bandito (P)	06:48	06:48
Bra (A)	06:54	06:54
Bra (P)	06:56	06:57
Pocapaglia (A)	07:01	07:02
Pocapaglia (P)	07:02	07:03
Santa Vittoria d'Alba (A)	07:05	07:06
Santa Vittoria d'Alba (P)	07:07	07:07
Monticello d'Alba (A)	07:12	07:12
Monticello d'Alba (P)	07:13	07:13
Mussotto (A)	07:17	07:17
Mussotto (P)	07:18	07:18
Alba (A)	07:21	07:21

Tabella 7.8 - Modello di esercizio C, SFM 4: prima traccia orario pari della giornata

Tratta	Orario (hh:mm)	
	Scenario infrastrutturale 3	Scenario infrastrutturale 4
Alba (P)	05:28	05:29
Mussotto (A)	05:31	05:32
Mussotto (P)	05:32	05:33
Monticello d'Alba (A)	05:36	05:37
Monticello d'Alba (P)	05:37	05:38
Santa Vittoria d'Alba (A)	05:42	05:43
Santa Vittoria d'Alba (P)	05:46	05:46
Pocapaglia (A)	05:49	05:49
Pocapaglia (P)	05:50	05:50
Bra (A)	05:57	05:57
Bra (P)	06:01	06:01
Bandito (A)	06:05	06:05
Bandito (P)	06:06	06:06
Sanfrè (P)	06:09	06:09
Sanfrè (A)	06:10	06:10
Sommariva del Bosco (A)	06:13	06:13
Sommariva del Bosco (P)	06:14	06:14
Carmagnola (A)	06:21	06:21
Carmagnola (P)	06:22	06:22
Villastellone (A)	06:27	06:27
Villastellone (P)	06:28	06:28
Trofarello (A)	06:33	06:33
Trofarello (P)	06:34	06:34

Tabella 7.9 - Modello di esercizio C, RV: prima traccia orario dispari della giornata

Tratta	Orario (hh:mm)	
	Scenario infrastrutturale 3	Scenario infrastrutturale 4
<i>Trofarello (T)</i>	06:07	06:07
<i>Villastellone (T)</i>	06:11	06:11
Carmagnola (A)	06:15	06:15
Carmagnola (P)	06:16	06:16
<i>Racconigi (T)</i>	06:21	06:21
Cavallermaggiore (A)	06:25	06:25
Cavallermaggiore (P)	06:26	06:26
<i>Madonna del Pilone (T)</i>	06:31	06:31
Bra (A)	06:36	06:36
Bra (P)	06:38	06:38
<i>Pocapaglia (T)</i>	06:43	06:43
<i>Santa Vittoria d'Alba (T)</i>	06:45	06:45
<i>Monticello d'Alba (T)</i>	06:48	06:48
<i>Mussotto (T)</i>	06:51	06:51
Alba (A)	06:53	06:53

Tabella 7.10 - Modello di esercizio C, RV: prima traccia orario pari della giornata

Tratta	Orario (hh:mm)	
	Scenario infrastrutturale 3	Scenario infrastrutturale 4
Alba (P)	05:59	05:59
Mussotto (T)	06:01	06:01
Monticello d'Alba (T)	06:04	06:04
Santa Vittoria d'Alba (T)	06:07	06:07
Pocapaglia (T)	06:09	06:09
Bra (A)	06:15	06:15
Bra (P)	06:17	06:17
Madonna del Pilone (T)	06:21	06:21
Cavallermaggiore (A)	06:25	06:25
Cavallermaggiore (P)	06:26	06:26
Racconigi (T)	06:30	06:30
Carmagnola (A)	06:35	06:35
Carmagnola (P)	06:36	06:36
Villastellone (T)	06:41	06:41
Trofarello (T)	06:45	06:45

All'interno delle griglie di cadenzamento rigorose le corse vengono ripetute, senza alcuna modifica, ogni 60 minuti. Sono state pianificate 17 coppie di corse per la linea SFM 4 e 16 coppie per i Regionali Veloci, pertanto le ultime partenze della giornata si hanno rispettivamente 16 e 15 ore dopo le prime.

Introducendo anche in questo modello di esercizio le perturbazioni stocastiche tipiche dell'esercizio, si valutano gli eventuali aspetti positivi degli interventi infrastrutturali, dal momento che sull'orario schedulato le differenze tra gli scenari analizzati sono trascurabili. Nei grafici seguenti si analizza l'evoluzione del ritardo medio delle corse, ottenuto tramite le simulazioni, lungo i due percorsi (e per ciascuno andata e ritorno).

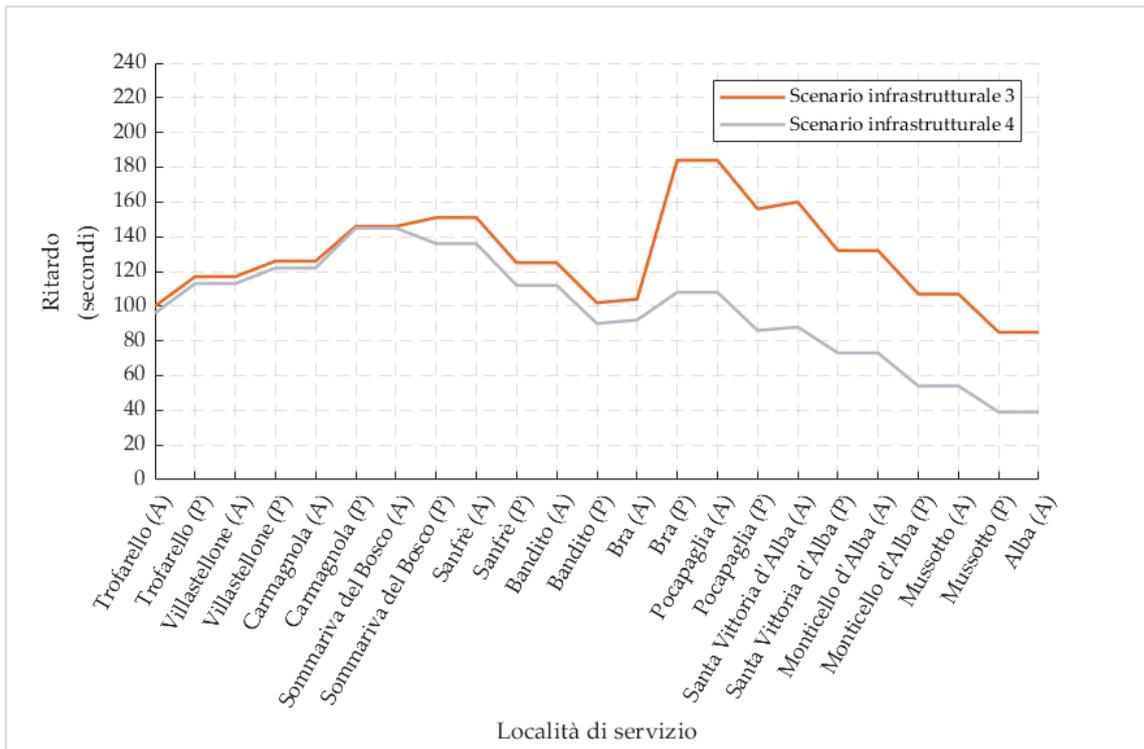


Figura 7.10 - Modello di esercizio C, SFM 4: evoluzione del ritardo medio in corsa (corse dispari)

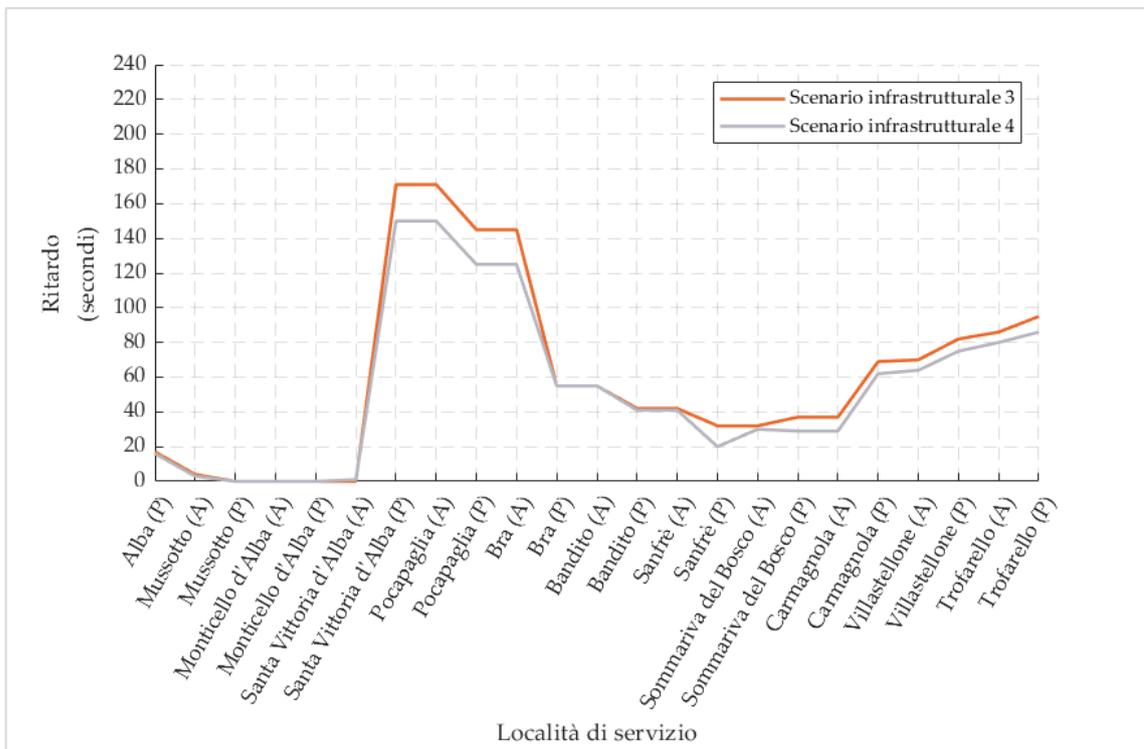


Figura 7.11 - Modello di esercizio C, SFM 4: evoluzione del ritardo medio in corsa (corse pari)

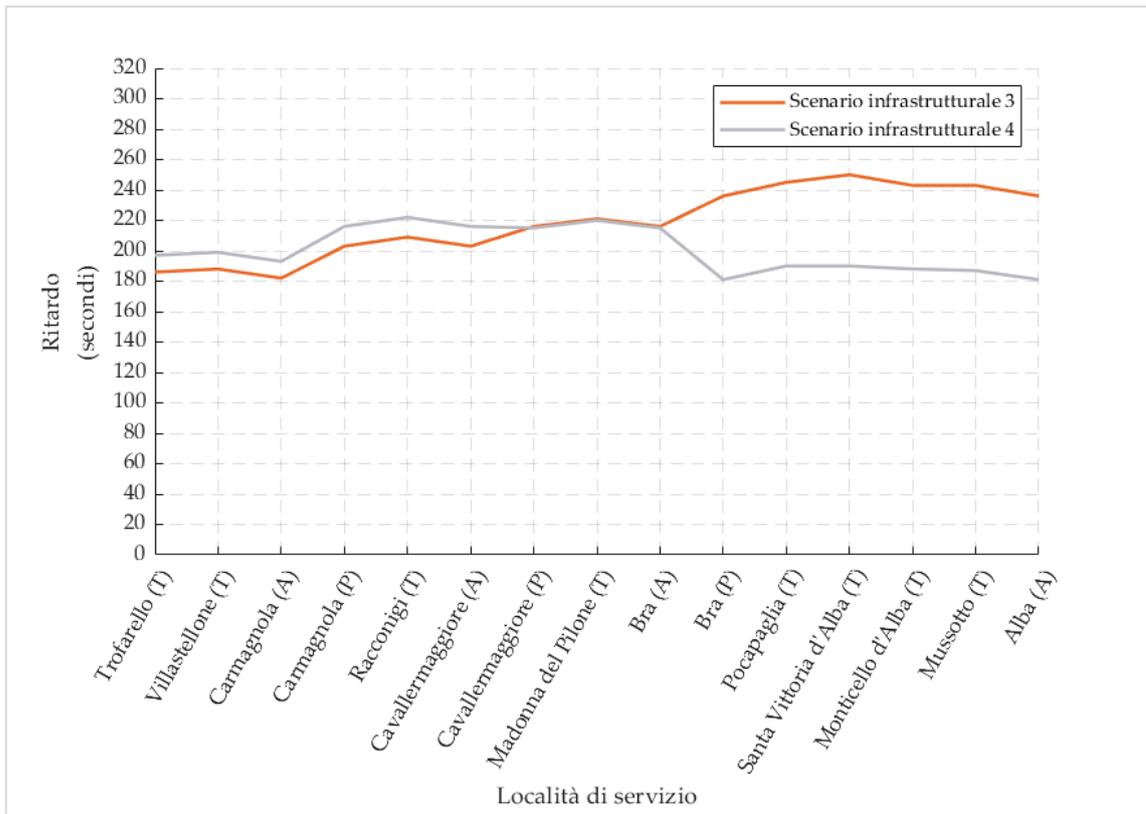


Figura 7.12 - Modello di esercizio C, RV: evoluzione del ritardo medio in corsa (corse dispari)

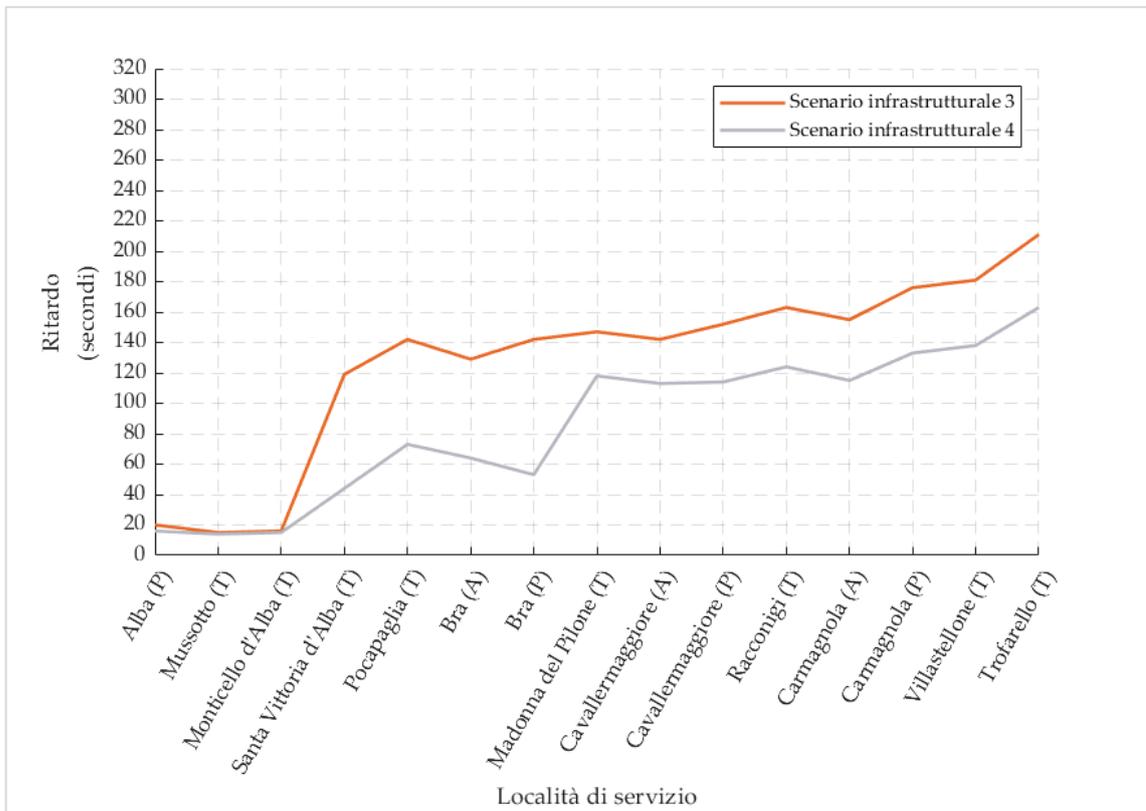


Figura 7.13 - Modello di esercizio C, RV: evoluzione del ritardo medio in corsa (corse pari)

A partire da tali grafici si osserva come l'abilitazione ai movimenti contemporanei nelle stazioni di Santa Vittoria d'Alba e di Alba generi una riduzione dei ritardi, per i motivi già presentati nel modello di esercizio B, rendendo così più flessibile l'incrocio nelle stazioni ed evitando che l'intero ritardo (o anche maggiorato) si propaghi nella direzione opposta. Si ricordi che la *flank protection* nelle stazioni non abilitate ai movimenti contemporanei dei treni è stata posta pari a 60 secondi, ma tale valore è ideale: nella realtà, qualora sia maggiore, sarebbero ancora più notevoli le differenze tra i due scenari infrastrutturali proposti. Pertanto, sarebbe opportuno realizzare lo scenario infrastrutturale 4, ai fini sia della stabilità e robustezza d'orario che della sicurezza dei passeggeri (grazie ai sottopassaggi). Di seguito sono presentate in maniera schematica le differenze tra i due scenari infrastrutturali considerati.

Tabella 7.11 - Modello di esercizio C, SFM 4: comparazione degli scenari infrastrutturali

Parametro di confronto	Scenario infrastrutturale 4 vs Scenario infrastrutturale 3
Tempo di viaggio totale Trofarello - Alba	Nessuna differenza
Tempo di viaggio totale Alba - Trofarello	- 1 minuto
Ritardo medio in entrata nel nodo di Torino	- 9 secondi
Ritardo medio lungo il percorso Trofarello - Alba	- 31 secondi
Ritardo medio lungo il percorso Alba - Trofarello	- 6 secondi

Tabella 7.12 - Modello di esercizio C, RV: comparazione degli scenari infrastrutturali

Parametro di confronto	Scenario infrastrutturale 4 vs Scenario infrastrutturale 3
Tempo di viaggio totale Trofarello - Alba	Nessuna differenza
Tempo di viaggio totale Alba - Trofarello	Nessuna differenza
Ritardo medio in entrata nel nodo di Torino	- 48 secondi
Ritardo medio lungo il percorso Trofarello - Alba	-17 secondi
Ritardo medio lungo il percorso Alba - Trofarello	- 41 secondi

7.4 Interventi richiesti per modello di esercizio D

Per il modello di esercizio che contempla sia il passaggio da un cadenzamento orario a uno semi-orario delle corse del SFM 4, sia l'inserimento di nuove coppie di treni Regionali Veloci istradati via Cavallermaggiore, le maggiori criticità si presentano nel tratto compreso fra le stazioni di Bra e di Alba. Dal momento che inviare tre treni all'ora per direzione di marcia su una linea a semplice binario è un obiettivo piuttosto sfidante, si è optato per attuare tutti i possibili interventi di upgrade infrastrutturale disponibili:

- abilitazione ai movimenti contemporanei dei treni per le stazioni di Santa Vittoria d'Alba ed Alba;
- trasformazione in stazioni per le fermate di Pocapaglia, Monticello d'Alba e Mussotto.

Questi interventi, localizzati fra Bra ed Alba si vanno ad aggiungere a tutti gli altri possibili, già proposti per la fattibilità dei modelli di esercizio B e C, localizzati nelle stazioni di Trofarello, Sommariva del Bosco, Sanfrè, Racconigi e Cavallermaggiore.

La mancata fattibilità di tale modello di esercizio è dovuta proprio alle criticità del tratto Bra - Alba: il problema è insito nel voler creare delle tracce orario con molti vincoli e risulta impossibile rispettarli tutti in assenza di una linea a doppio binario. Pur incrementando i punti di incrocio, infatti, inserire una griglia di cadenzamento semi-orario rigorosa assieme a delle corse che non seguono le medesime tracce orario è assai difficoltoso. Per permettere l'inserimento di tutte le tracce bisognerebbe diminuire i vincoli, ad esempio sostituire a una griglia semi-oraria due griglie con cadenzamento orario su medesimi percorsi, avendo così 2 treni all'ora per direzione per la linea 4 del Servizio Ferroviario Metropolitano, ma senza avere una frequenza dei passaggi esattamente pari a 30 minuti. Un'altra complicazione è legata all'eterotachicità delle corse fornite dai due differenti servizi (SFM 4 e RV): si potrebbero pianificare precedenze in stazione, ma questo allungherebbe eccessivamente i tempi di percorrenza dei treni del SFM 4, a causa di un assai maggiore tempo di fermata in alcune località, oppure "allargare" le tracce dei Regionali Veloci, ma così facendo si avrebbe un allungamento dei tempi di percorrenza tra Alba e Bra che snaturerebbe il collegamento rapido.

Infine, anche riuscendo a inserire 3 treni all'ora per direzione di marcia, accettando di rinunciare alla minimizzazione dei tempi di percorrenza, si otterrebbe un orario che praticamente satura l'infrastruttura durante la maggior parte della giornata, con un'elevata instabilità che comporterebbe la propagazione di ritardi via via crescenti in entrambe le direzioni in caso di perturbazioni (anche inferiori ai 5 minuti) alla circolazione.

Ciò detto, per applicare questo modello di esercizio con ottime performance in termini di tempi di percorrenza e di stabilità d'orario, l'unica soluzione sarebbe il raddoppio della tratta Alba - Bra. Tuttavia, bisognerebbe tenere ben presente l'aspetto dei costi, dal momento che ci si trova in un territorio collinare ed è presente, tra l'altro, un tratto in galleria (tra Bra e Pocapaglia, galleria Fey). Un investimento di tale portata sarebbe giustificato solo nel caso in cui si avesse intenzione di far circolare un maggiore numero di treni per direzione di marcia; dunque, si potrebbe considerare la possibilità di un raddoppio selettivo.

Capitolo 8

Conclusioni e possibili sviluppi futuri

Alla luce dello studio effettuato si osserva come già con l'infrastruttura attualmente presente (relativamente al tratto Trofarello - Alba) sia possibile realizzare un modello di esercizio con cadenzamento semi-orario per la linea SFM 4 (modello di esercizio B).

Per quanto riguarda l'aggiunta di un servizio con cadenzamento orario di coppie di treni Regionali Veloci aventi percorso Torino Porta Nuova - Alba, via Cavallermaggiore (modello di esercizio C), risulta necessario procedere all'elettificazione della tratta Cavallermaggiore - Bra della ferrovia Cavallermaggiore - Alessandria e alle modifiche proposte per il piano di stazione di Cavallermaggiore. Per raggiungere i risultati ottenuti nello studio è inoltre richiesta la realizzazione di una coppia di comunicazioni semplici nella stazione di Trofarello, in radice sud, con deviatori percorribili a 100 km/h, che forniscano la possibilità di un istradamento veloce in linea Genova ai convogli provenienti dalla linea Torino - Fossano - Savona.

Non risulta invece fattibile il modello di esercizio D, che includerebbe sia il raddoppio delle corse del SFM 4 sia l'aggiunta dei nuovi treni RV.

Tuttavia, come ampiamente descritto nel *capitolo 7*, ai fini della stabilità e della robustezza d'orario, nonché della sicurezza dei viaggiatori, la scelta più opportuna sarebbe quella di realizzare le modifiche proposte per le stazioni di Sommariva del Bosco, Santa Vittoria d'Alba ed Alba che permettano i movimenti contemporanei dei treni. Si tenga presente, infatti, che all'interno del modello si è adottato un tempo caratteristico per il rilascio della *flank protection* (protezione da fiancheggiamento su itinerari convergenti in stazione, legata al sistema RAR, Rilevamento Attraversamento a Raso, ossia il dispositivo di consenso per gli incroci) deterministico di 60 secondi: tale valore risulta piuttosto ottimistico e si prevede che, nel caso in cui venga considerato una variabile aleatoria (come effettivamente accade nella realtà), può facilmente raggiungere valori più elevati. In questo caso le perdite di tempo dovute alla mancata possibilità di eseguire i movimenti contemporanei in stazione sarebbero ben maggiori, a scapito di stabilità e robustezza d'orario.

Gli altri interventi, relativi alle stazioni di Sanfrè e Racconigi, risulterebbero utili invece solo ai fini della flessibilità nella gestione attiva del traffico ferroviario, da attuarsi ad esempio in caso di rilevanti perturbazioni rispetto all'orario pianificato.

Dal punto di vista metodologico si conferma come un numero di corse modesto, fino a 2 all'ora per direzione, sia ampiamente sostenibile da una linea a semplice binario, anche se ciò risulta strettamente influenzato dalla conformazione dell'infrastruttura (in primis numero, localizzazione e caratteristiche dei punti di incrocio/precedenza fra treni) e dall'eterogeneità delle corse (che si riflette nell'eterotachicità dell'esercizio).

La pianificazione di modelli di esercizio basati su griglie di cadenzamento risulta una scelta appropriata e compatibile con le corse già presenti nel sistema oggetto di studio.

È importante infine sottolineare il valore aggiunto della simulazione che, grazie alla possibilità di modellizzare le perturbazioni tipiche dell'esercizio ferroviario e, dunque, di andare oltre un approccio analitico-deterministico, permette di ottenere risultati molto più aderenti alla realtà e, dunque, di immediato utilizzo, di qualsiasi modello sintetico o analitico.

8.1 Raddoppio selettivo Bra - Alba

Nel caso in cui si vogliano offrire entrambi i servizi previsti nel modello di esercizio D, senza procedere ad un raddoppio integrale della linea, a causa degli elevati costi previsti e alla presenza di tratti in zone fortemente urbanizzate, una possibile alternativa su cui approfondire lo studio è quella di un raddoppio selettivo della tratta Bra - Alba della ferrovia Cavallermaggiore - Alessandria. Come già argomentato nel *paragrafo 7.4*, le maggiori criticità che comportano la mancata fattibilità dell'orario si concentrano su questo tratto, dal momento che bisognerebbe inserire 3 treni all'ora per direzione di marcia, neppure aventi tutti stesso tipo di tracce orario (si è detto più che volte che l'eterogeneità del traffico è un elemento critico su linee a binario unico).

Analizzando il territorio con l'ausilio delle immagini satellitari si vede come unicamente i tratti Bra - Pocalaglia e Mussotto - Alba, caratterizzati rispettivamente dalla presenza della galleria naturale Fey e del ponte sul fiume Tanaro, nonché in ogni

caso dalla fitta presenza edilizia, presentino maggiori vincoli alla posa del secondo binario. Per il restante tratto collinare di mezzo, compreso fra Pocapaglia e Mussotto, si potrebbe studiare la fattibilità del modello di esercizio D successivamente all'inserimento di sezioni a doppio binario.

8.2 Ripristino fermata Santena - Tetti Giro

Sulla linea Torino - Fossano - Savona, nel tratto compreso fra Trofarello e Villastellone era attiva, sino al 2003, la fermata di Santena - Tetti Giro, collocata nella frazione Tetti Giro, a servizio del Comune di Santena.

La popolazione residente in tale Comune contava 10.764 abitanti al 1° gennaio 2018; tale fermata ad oggi sarebbe pressoché inglobata nel tessuto urbano e presenterebbe la possibilità di essere raggiunta a comodamente, anche a piedi, da ogni parte del centro abitato. Si segnala inoltre la vicina presenza di un'importante industria di trasformazione alimentare, possibile polo attrattore di spostamenti.

Attualmente la stazione più vicina a servizio del comune di Santena è quella di Cambiano-Santena, posta in territorio di Cambiano, e servita unicamente dai treni della linea SFM 6 Torino - Asti. La riattivazione della suddetta fermata permetterebbe di avere molti più collegamenti a servizio del bacino d'utenza locale, grazie ai treni delle linee 4 e 7 del Servizio Ferroviario Metropolitano.

L'effettuazione di tale fermata comporterebbe un allungamento delle tracce orario pari a 3 minuti, comprendendo sia i perditempo per frenata e ripartenza, sia i 60 secondi da destinare alla sosta per l'effettuazione del servizio passeggeri.

8.3 Integrazione con progetto MetroGranda

Lo studio presentato nella Tesi è legato al potenziamento dei collegamenti fra le zone del Roero e delle Langhe con la città di Torino, tuttavia troverebbe ottima integrazione con il progetto MetroGranda.

Quest'ultimo è un lavoro di ricerca, realizzato dal Politecnico di Torino - DAD, che indaga la fattibilità – infrastrutturale ed economica – ed il percorso da intraprendere per

trasformare alcune delle tratte ferroviarie sospese o dismesse della Provincia di Cuneo (assieme ad alcuni tratti ancora in uso, tra cui Cavallermaggiore - Bra), in un sistema integrato di mobilità pubblica locale. MetroGranda consiste un anello ferroviario di 160 km che unisce cinque importanti centri – le Città di Bra, Savigliano, Saluzzo, Cuneo e Mondovì – e tocca tutti le principali realtà insediative della Granda: il territorio alpino e pedemontano (con i Parchi del Monviso e delle Alpi Marittime), la pianura agricola centrale (con il Parco Fluviale Gesso e Stura) e le colline di Langhe e Roero (Patrimonio Unesco).

Qualora questo servizio venisse istituito, con cadenzamento orario, nel tratto Cavallermaggiore - Bra andrebbe a sostituire l'attuale linea SFM B. Non si creerebbe alcun problema di compatibilità con le corse Regionali Veloci Torino - Alba istradate via Cavallermaggiore dal momento che nel modello di esercizio C la griglia del SFM B è stata traslata temporalmente in modo tale da evitare l'incompatibilità di tali collegamenti (avendo corse ogni 30 minuti tra Cavallermaggiore e Bra ed evitando la soppressione della fermata di Madonna del Pilone, servita solo dal SFM B, la quale ha subito di recente un intervento di *restyling*, con adeguamento dei marciapiedi al requisito europeo di 55 cm di altezza).



Figura 8.1 - Fermata di Madonna del Pilone

8.4 Integrazione con riattivazione linee Alba - Alessandria e Alba - Asti

Per quanto riguarda invece l'integrazione dei modelli di esercizio studiati con le corse che si aggiungerebbero nella stazione di Alba nel caso di revoca della sospensione del servizio passeggeri sulle direttrici Alba - Alessandria e Alba - Asti, bisognerebbe verificare che la stazione di Alba abbia una capacità sufficiente a gestire i convogli. Tali linee hanno percorso comune da Alba a Castagnole delle Lanze; attualmente (luglio 2019) è allo studio la riattivazione dei collegamenti per Asti.

Tutte le corse su Alba da/per Torino, in tutti i modelli di esercizio realizzati (B e C), impiegano i binari 1 e 2 nella stazione di Alba. Si prevede che nel modello di esercizio D debba essere impiegato anche il binario 3. In tal caso sarebbe necessaria una modifica ed espansione del piano di stazione, parallelamente a quanto già realizzato a Bra, ove sono presenti 5 binari passanti (più uno tronco lato Cavallermaggiore). Le difficoltà tecniche sarebbero limitate anche grazie alla disponibilità di spazi, mostrata nella fotografia in *Figura 8.2*, essendo stati dismessi dei binari di manovra oltre l'attuale binario 3.



Figura 8.2 - Spazio disponibile per l'ampliamento del fascio binari nella stazione di Alba

8.5 Circolabilità dei treni merci

Fino a questo momento ci si è concentrati sul trasporto passeggeri, contemplando il traffico merci solo nello studio delle corse già esistenti sulla rete considerata, assunte come vincoli nella costruzione dei modelli di esercizio.

Tuttavia, potrebbe destare grande interesse la possibilità di inserire tracce merci, dal momento che sono presenti nei pressi della linea Bra - Alba grandi industrie e magazzini che potrebbero essere interessate ad essere raccordate direttamente alla rete ferroviaria. Tra l'altro, è possibile osservare con l'ausilio delle immagini satellitari, che alcuni raccordi sono già presenti (ad esempio nei pressi della stazione di Monticello d'Alba e di Santa Vittoria d'Alba), ma sono stati resi inutilizzabili con la rimozione dei deviatori di giunzione alla linea principale.

Le tracce merci si potrebbero inserire alla mattina presto (prima dell'inizio delle corse passeggeri), in tarda serata o nella notte (compatibilmente con le fasce di chiusura al traffico ferroviario causa lavori di manutenzione all'infrastruttura), oppure ancora di giorno nel caso in cui nelle fasce di morbida si decida di eliminare qualche traccia orario dalle griglie di cadenzamento dei servizi dedicati ai passeggeri.

Nelle condizioni attuali (luglio 2019), l'infrastruttura ricadente nel sistema oggetto di studio, ammette la circolabilità dei treni merci secondo le limitazioni di massa assiale, sagoma e modulo riportate in *Tabella 8.1*.

Tabella 8.1 - Limiti di circolabilità sulle linee di interesse

Tratta ferroviaria	Massa assiale massima ammessa	Sagoma limite ammessa (codifica a due cifre per trasporto combinato)	Modulo
Trofarello - Cavallermaggiore	C 3	PC 45	590
Carmagnola - Bra	C 3 con limitazioni	PC 32	430
Cavallermaggiore - Bra	C 3 con limitazioni	PC 45	420
Bra - Alba	C 3 con limitazioni	FS	300

8.6 Specializzazione del traffico ferroviario nella parte sud del nodo di Torino tra linea “Genova” e linea “Savona”

Nel *paragrafo 4.4* si è presentata l’attuale ripartizione del traffico ferroviario nella parte sud del nodo di Torino, ossia nel tratto a monte della stazione di Trofarello, in cui sono presenti due linee a doppio binario affiancate, denominate linea “Genova” e linea “Savona”. La quasi totalità dei treni facenti parte del Servizio Ferroviario Metropolitano di Torino che transitano nella stazione di Trofarello viene istradata in linea “Savona” indipendentemente dall’origine o destinazione, mentre per tutte le altre categorie commerciali, sia passeggeri sia merci, non c’è un itinerario preferenziale, ma spesso la scelta è influenzata dall’origine o destinazione.

Considerando l’installazione di una coppia di comunicazioni semplici nella stazione di Trofarello, in radice sud, con deviatori percorribili a 100 km/h, che forniscano la possibilità di un istradamento veloce in linea Genova ai convogli provenienti dalla linea Torino - Fossano - Savona, i perditempo per l’impostazione su tale itinerario sarebbero fortemente ridotti rispetto alla situazione attuale (in cui viene impiegata una coppia di comunicazioni semplici nella stazione di Trofarello, in radice nord, con deviatori percorribili a 60 km/h).

Si consideri che nella stazione di Trofarello confluiscono le linee 1, 4, 6 e 7 del SFM, ma a partire dalla stazione di Moncalieri in linea “Savona” si aggiungono anche i convogli delle corse della linea SFM 2 Chivasso - Pinerolo. Dal momento che si prevede nei prossimi anni un graduale aumento delle corse del Servizio Ferroviario Metropolitano potrebbe essere di grande interesse studiare una redistribuzione delle tracce orario fra le due linee affiancate, eventualmente pensando una “specializzazione” degli itinerari, in modo tale da avere delle circolazioni il più possibile omotachiche: si ricordi che ridurre l’eterogeneità del traffico su una linea può comportare un apprezzabile aumento di capacità.

Parallelamente alla scelta di istradare in linea “Savona” tutti i convogli delle varie linee del Servizio Ferroviario Metropolitano, bisognerebbe inviare tutti i treni Regionali Veloci e a lunga percorrenza in linea “Genova”: pur ricoprendo categorie commerciali differenti,

nella maggior parte dei casi vengono effettuate le medesime fermate nel tratto sud del nodo di Torino (da Trofarello incluso in poi, Torino Lingotto unica sosta prima di Torino Porta Nuova).

Bisognerebbe infine analizzare gli istradamenti ideali per i treni merci.

Tutto ciò va studiato, con lungimiranza, tenendo conto del Piano nazionale di implementazione di ERTMS, redatto nel 2017 dalla Direzione Generale per il Trasporto e le Infrastrutture Ferroviarie del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti: per il nodo di Torino è prevista l'installazione del sistema HD ERTMS entro il 2021.

Tale sistema, da realizzarsi in sovrapposizione e in compatibilità con SCMT, servirà a massimizzare la capacità ferroviaria delle linee di nodo. Esso consiste nell'impiego di ERTMS/ETCS Livello 2 con funzione di integrità treno a bordo (propria del Livello 3), opportunamente ottimizzato per specifico materiale rotabile, al fine di massimizzare le funzionalità di alta densità.

Inoltre è previsto lo sviluppo dell'interfaccia con funzione ATO (*Automatic Train Operation*) che porterà ad ulteriori ottimizzazioni del traffico.

Nei nodi sarà previsto l'utilizzo di un *Radio Block Centre* (posto centrale dal quale viene tenuta sotto controllo e gestita la circolazione dei treni), detto "RBC di Nodo", mediante il quale saranno gestiti i treni che saranno incanalati in "flussi" opportunamente individuati e specializzati con sezioni ridotte di lunghezza pari a circa 350 m in linea e in stazione.

Bibliografia

- Abril, M., Barber, F., Ingolotti, L., Salido, M. A., Tormos, P., Lova, A. (2008), *An assessment of railway capacity*, Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review
- Agenzia della Mobilità Piemontese (2016), *Progetto di Servizio Ferroviario*, Torino
- Anselma, S., Dalla Chiara, B., Deflorio, F., Di Felice, D. (2007), *Il cadenzamento integrato: applicazione alla rete ferroviaria piemontese*, Ingegneria Ferroviaria, Giugno
- Commissione Europea (2014), *STI per l'accessibilità del sistema ferroviario dell'UE per le persone con disabilità e le persone a mobilità ridotta*, Gazzetta Ufficiale dell'Unione Europea
- Colombo, L., Giordano, R., Rostirolla, P., *Delimitazione delle aree metropolitane italiane, Parte I, Sistemi di Logistica*, Anno XII - n. 2, Giugno 2019
- Coviello, N. (2015), *Modelling periodic operations on single track lines: Timetable design and stability evaluation*, Elsevier
- Coviello, N. (2018), *Valutazioni di capacità basate sull'orario: analisi di una ferrovia suburbana a singolo binario*, Ingegneria Ferroviaria, Aprile
- Dalla Chiara, B. (2012), *Engineering and design of railway systems*, CLUT, Torino
- Emery, D. (2010), *Increasing the capacity of a single-track line*, 10th Swiss Transport Research Conference, Monte Verità (Ascona)
- Goverde, R. M. P., Hansen, I. A. (2013), *Performance Indicators for Railway Timetables*, 2013 IEEE International Conference on Intelligent Rail Transportation, Pechino
- Goverde, R. M. P., Besinovic, N., Binder, A., Cacchiani, V., Quaglietta, E., Roberti, R., Toth, P. (2015), *A three-level framework for performance-based railway timetabling*, 6th International Conference on Railway Operations Modelling and Analysis, Tokyo

- Higgins, A., Kozan, E., Ferreira, L., (1997), *Modeling the Number and Location of Sidings on a Single Line Railway*, Computers and Operations Research, Vol.24, No.3
- Kontaxi, E., Ricci, S. (2012), *Railway Capacity Handbook: A Systematic Approach to Methodologies*, Elsevier
- Lindfeldt, A. (2012), *Congested railways: Influence of infrastructure and timetable properties on delay propagation*, KTH Royal Institute of Technology, Stoccolma
- Lindfeldt, O. (2007), *Quality on single-track railway lines with passenger traffic - Analytical model for evaluation of crossing stations and partial double-tracks*, KTH Royal Institute of Technology, Stoccolma
- Maione, U., Moisello, U. (1993), *Elementi di statistica per l'idrologia*, La goliardica pavese, Pavia
- Medeossi, G., Longo, G., De Fabris, S. (2011), *A method for using stochastic blocking times to improve timetable planning*, Elsevier
- Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti (2017), *Piano nazionale di implementazione di ERTMS*, Roma
- Pascariu, B. (2019), *Studio della capacità ferroviaria con metodi di simulazione: il nodo merci di Novara*, Tesi di Laurea Magistrale, Politecnico di Torino, Torino
- Rete Ferroviaria Italiana (2018), *Fascicolo di Linea n.8 (Circolari Territoriali e Fascicoli Circolazione Linee)*
- Rete Ferroviaria Italiana (2019), *Fascicolo di Linea n.10 (Circolari Territoriali e Fascicoli Circolazione Linee)*
- Rete Ferroviaria Italiana (1997), *Istruzione per il Servizio dei Deviatori*
- Rete Ferroviaria Italiana (2017), *Prefazione Generale all'Orario di Servizio*
- Rete Ferroviaria Italiana (2006), *Prescrizione "Variazione in corso d'orario alle tracce orario dei treni."*

- Rete Ferroviaria Italiana (2009), *Regolamento per la Circolazione dei Treni*
- Rete Ferroviaria Italiana (2016), *Regolamento sui Segnali in uso sull'infrastruttura nazionale*
- Shih, M.-C., (Rex) Lai, Y.-C., Dick, C. T., Wu, M.-H. (2014), *Optimization of Siding Location for Single-Track Lines*, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 2448, Washington
- Sipilä, H. (2015), *A simulation based framework for evaluating effects of infrastructure improvements on scheduled and operational delays*, KTH Royal Institute of Technology, Stoccolma
- UIC (2013), *Code 406 R: Capacity*, Parigi
- The European House - Ambrosetti, Ferrovie dello Stato Italiane (2017), *Il Futuro della Mobilità Urbana, Integrazione e nuovi modelli di gestione nel caso italiano*, Milano
- Zhou, X., Zhong, M., (2007), *Single-track timetabling with guaranteed optimality: Branch-and-bound algorithms with enhanced lower bounds*, Elsevier

Sitografia

Branch and bound, Wikipedia, the free encyclopedia

https://en.wikipedia.org/wiki/Branch_and_bound

Carta geografica del Piemonte, Loescher.it

http://www.loescher.it/librionline/risorse_vagamondo/download/regioni/piemonte_carta_dati.pdf

Dati tecnici dei vagoni, TRANSWAGGON

<http://www.transwaggon.it/index.php?id=292>

Ferrovia Bastia Mondovì-Mondovì, Wikipedia, l'enciclopedia libera

https://it.wikipedia.org/wiki/Ferrovia_Bastia_Mondov%C3%AC-Mondov%C3%AC

Ferrovia Bra-Ceva, Wikipedia, l'enciclopedia libera

https://it.wikipedia.org/wiki/Ferrovia_Bra-Ceva

Ferrovia Cuneo-Mondovì, Wikipedia, l'enciclopedia libera

https://it.wikipedia.org/wiki/Ferrovia_Cuneo-Mondov%C3%AC

Ferrovia Savigliano-Saluzzo-Cuneo, Wikipedia, l'enciclopedia libera

https://it.wikipedia.org/wiki/Ferrovia_Savigliano-Saluzzo-Cuneo

Ferrovie, dal 6 agosto la Torino-Rivarolo a 50 km orari, Ferrovie.info

<https://www.ferrovie.info/index.php/it/13-treni-reali/5852-ferrovie-dal-6-agosto-la-torino-rivarolo-a-50-km-orari>

Ferrovie: più frequenze e treni nuovi, rivoluzione Trenitalia nel nodo di Torino, Ferrovie.info

<https://ferrovie.info/index.php/it/13-treni-reali/9640-ferrovie-piu-frequenze-e-treni-nuovi-rivoluzione-trenitalia-nel-nodo-di-torino>

Focus sugli ETR.324 ed ETR.425, Ferrovie.it

<http://www.ferrovie.it/portale/articoli/1199>

I nostri carri per le vostre merci, FS

https://www.ferrovieinrete.com/manuali-ferroviari/fs_carri_merci.pdf

Le 8 linee SFM, Servizio Ferroviario Metropolitano Torino

<http://www.sfmtorino.it/>

MetroGranda | *Mobilità e Territorio*, Politecnico di Torino

<http://metrogranda.polito.it/>

PIC - Piattaforma Integrata Circolazione, Rete Ferroviaria Italiana

<https://picweb.rfi.it/default.aspx>

PIR - Prospetto Informativo della Rete, Rete Ferroviaria Italiana

<https://pir.rfi.it/pir/Default.aspx>

Réseau express régional d'Île-de-France, Wikipédia, l'encyclopédie libre

https://it.wikipedia.org/wiki/R%C3%A9seau_express_r%C3%A9gional_d%27%C3%8Eile-de-France

RFI, Alba - Bra: inaugurata oggi la nuova linea elettrificata, FS News

<http://www.fsnews.it/fsn/Sala-stampa/Comunicati/RFI-Alba-Bra-inaugurata-oggi-la-nuova-linea-elettrificata>

RFI, parte la sperimentazione del nuovo sistema di segnalamento ERTMS livello 3 Regional, FS News

<http://www.fsnews.it/fsn/Sala-stampa/Comunicati/RFI-parte-sperimentazione-nuovo-sistema-segnalamento-ERTMS-livello-3-Regional>

Scheda tecnica carrozza Gran Confort, Wikipedia, l'enciclopedia libera

https://it.wikipedia.org/wiki/Carrozze_FS_tipo_Gran_Confort

Scheda tecnica carrozza letti tipo MU, Wikipedia, l'enciclopedia libera

https://it.wikipedia.org/wiki/Carrozza_letti#Carrozza_tipo_MU

Scheda tecnica carrozza MDVC, Wikipedia, l'enciclopedia libera

https://it.wikipedia.org/wiki/Carrozze_FS_tipo_MDVC

Scheda tecnica carrozza MDVE, Wikipedia, l'enciclopedia libera

https://it.wikipedia.org/wiki/Carrozze_FS_tipo_MDVE

Scheda tecnica carrozza UIC-X, Wikipedia, l'enciclopedia libera

https://it.wikipedia.org/wiki/Carrozza_UIC-X

Scheda tecnica carrozza UIC-Z1, Wikipedia, l'enciclopedia libera

https://it.wikipedia.org/wiki/Carrozza_UIC-Z1

Scheda tecnica D100, Wikipedia, the free encyclopedia

https://en.wikipedia.org/wiki/Vossloh_G100_BB

Scheda tecnica D146, leferrovie.it

http://www.leferrovie.it/leferrovie/wiki/doku.php?id=schede_tecniche:manovra:d.146

Scheda tecnica D445, leferrovie.it

http://www.leferrovie.it/leferrovie/wiki/doku.php?id=schede_tecniche:diesel:locomotive:d.445

Scheda tecnica D520, Scala enne – NOTE SPARSE

<https://scalaenne.wordpress.com/2012/12/29/d-752-d-753-occhialona>

Scheda tecnica E191, Wikipedia, the free encyclopedia

[https://en.wikipedia.org/wiki/Vectron_\(locomotive\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Vectron_(locomotive))

Scheda tecnica E402.b, leferrovie.it

http://www.leferrovie.it/leferrovie/wiki/doku.php?id=schede_tecniche:elettrico:locomotive:e.402b

Scheda tecnica E464, leferrovie.it

http://www.leferrovie.it/leferrovie/wiki/doku.php?id=schede_tecniche:elettrico:locomotive:e.464

Scheda tecnica E483, Akiem

<https://www.akiem.com/wp-content/uploads/sites/2/2018/07/E-483-IT.pdf>

Scheda tecnica E633, leferrovie.it

http://www.leferrovie.it/leferrovie/wiki/doku.php?id=schede_tecniche:elettrico:locomotive:e.633

Scheda tecnica E652, leferrovie.it

http://www.leferrovie.it/leferrovie/wiki/doku.php?id=schede_tecniche:elettrico:locomotive:e.652

Scheda tecnica E655, leferrovie.it

http://www.leferrovie.it/leferrovie/wiki/doku.php?id=schede_tecniche:elettrico:locomotive:e.655

Scheda tecnica ETR425 (Jazz), FS News

http://www.fsnews.it/cms-file/allegati/fsnews/jazz_brochure.pdf

Scheda tecnica Minuetto diesel, leferrovie.it

http://www.leferrovie.it/leferrovie/wiki/doku.php?id=schede_tecniche:automotrici:termiche:aln_50_1_502

Scheda tecnica Minuetto elettrico, leferrovie.it

http://www.leferrovie.it/leferrovie/wiki/doku.php?id=schede_tecniche:automotrici:elettriche:ale_50_1_502

Scheda tecnica Treno ad Alta Frenquentazione (TAF), leferrovie.it

http://www.leferrovie.it/leferrovie/wiki/doku.php?id=schede_tecniche:automotrici:elettriche:ale_42_6_506

Servizio Ferroviario Regionale del Piemonte, SFR Piemonte

<http://www.sfrpiemonte.it/>

Statistiche demografiche ISTAT 2018, GeoDemo - Demografia in Cifre (ISTAT)

<http://demo.istat.it/pop2018/index1.html>

Trenitalia: vinta gara per servizio ferroviario metropolitano nel nodo di Torino, FS News

<http://www.fsnews.it/fsn/Gruppo-FS-Italiane/Trenitalia/Trenitalia-vinta-gara-per-servizio-ferroviario-metropolitano-nodo-Torino>

Ringraziamenti

Questo lavoro è frutto non solo del tempo dedicato all'approfondimento di quanto trattato ed alla sua stesura, ma anche di un percorso di studi iniziato nel settembre 2013 al Politecnico di Torino, che ha visto in sé la tappa intermedia del conseguimento della Laurea Triennale in Ingegneria Civile nel settembre 2016.

Il pensiero va a quanti mi hanno affiancato nella realizzazione della Tesi e mi hanno sostenuto durante l'intera avventura universitaria vissuta fino a questo momento.

Ringrazio il Prof. Bruno Dalla Chiara, relatore della Tesi, per avermi guidato nella stesura delle idee e consigliato con minuziosità, diventando un punto di riferimento.

Ringrazio l'Ing. Nicola Coviello, correlatore della Tesi, per avermi seguito sempre con impareggiabile disponibilità e competenza nella realizzazione del lavoro, nonostante i grandi impegni.

Ringrazio la società Rete Ferroviaria Italiana S.p.A., appartenente al gruppo Ferrovie dello Stato Italiane, in particolare nella figura dell'Ing. Emmanuele Vaghi, nonché dello Ing. Alessandro Caprarella, per avermi accolto negli uffici direzionali di Milano ed avermi fornito tutti i dati tecnici necessari per la migliore realizzazione possibile dello studio.

Un caloroso pensiero va in ogni momento alla mia famiglia, che mi sostiene e mi incoraggia, trasmettendomi la lucidità nell'affrontare i problemi e il valore della serenità.

Un pensiero di cuore va ai veri amici che conosco da prima dell'esperienza universitaria: mi sembra di averli da sempre accanto nella mia vita e l'immenso valore della loro presenza non perde mai brillantezza.

Un prezioso pensiero va agli amici conosciuti in questi anni a Torino, tra loro ci sono persone di grande valore: chi mi ha insegnato che con impegno e talento i risultati si conquistano nonostante le tante difficoltà, chi mi ha reso partecipe della sua curiosità in tanti mondi anche lontani da quelli ingegneristici, chi ha dato valore al mio aiuto e lo ha ricambiato con il cuore, chi ha riempito le mie giornate di sorrisi, chi ha condiviso con me l'impegno dei lavori di gruppo e ha contribuito a farmi comprendere quanto sia importante collaborare, chi ha convissuto sotto il mio stesso tetto impreziosendo di molteplici ricordi gli anni da studente fuori sede, chi mi ha fatto emozionare.

"...e quando pensi di sapere, hai ancora da imparare."

Gianni Morandi, *Grazie a tutti*