

**POLITECNICO DI TORINO**

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Gestionale



Tesi di Laurea Magistrale

**Simulazione di modelli di esercizio ferroviario:**

analisi sulla stabilità e potenziamento del

servizio sulla linea Torino – Pinerolo

Relatore: prof. ing. Bruno DALLA CHIARA

Correlatore: ing. dott. Nicola COVIELLO

Correlatore aziendale: ing. Andrea STANGHELLINI

Candidato: Leonarda OGNIBENE

Aprile 2021

*“L’immaginazione è più importante della conoscenza. La conoscenza è limitata, l’immaginazione abbraccia il mondo, stimolando il progresso, facendo nascere l’evoluzione.”*

*Albert Einstein*

## **Sommario**

L'obiettivo principale della presente tesi è valutare il tratto di linea che parte da Torino fino a Pinerolo, appartenente al servizio ferroviario metropolitano torinese (SFM).

L'esigenza di analizzare la tratta, in sinergia con l'Agenzia della Mobilità Piemontese, nasce a fronte di numerosi reclami dovuti ai ritardi in arrivo nelle varie stazioni che definiscono la linea ferroviaria.

Nello specifico la tesi si prefigge di trovare uno scenario che aumenti e migliori la stabilità dell'esercizio ferroviario su tale linea.

Per ottemperare all'obiettivo suindicato, si svolge un'analisi multi-scenario derivata dalla combinazione di interventi simulati sull'infrastruttura ferroviaria e di cambiamenti sull'orario cadenzato, cioè sul servizio orario offerto ai passeggeri. A livello teorico, l'approccio utilizzato è basato sulla simulazione degli orari ferroviari in presenza di configurazioni infrastrutturali diverse, approccio che permette di considerare tutti i parametri significativi che caratterizzano l'esercizio ferroviario. La simulazione viene svolta con uno strumento proprietario sviluppato al Politecnico di Torino.

I risultati forniti identificano uno scenario infrastrutturale adatto a migliorare la stabilità della linea trattata; inoltre analizzando la capacità ferroviaria si apporta un ulteriore plus all'analisi creando una nuova griglia di cadenzamento orario che massimizzi la capacità in termini di treni/h.

Gli incrementi di capacità, realizzati attraverso modifiche infrastrutturali, hanno portato alla costruzione della nuova griglia di cadenzamento. Tali incrementi sono valutati in termini di riduzione dei tempi di viaggio totali rispetto allo scenario infrastrutturale attualmente in essere.

## Abstract

The main objective of this Master degree thesis is to evaluate the railway line section from Torino (I) to Pinerolo, belonging to the “Servizio Ferroviario Metropolitan Torino”. The need to study this path, in synergy with the “Agenzia della Mobilità Piemontese” (the public body in charge of the transport planning and rail organization in the Piedmont Region), arises in response of several complaints by users, caused by delays on arrivals along the stations which define the railway line. Specifically, the thesis work aims at finding a scenario able to increment and improve the stability of operation of this rail line. A multi-scenario analysis is carried out to meet the prearranged goal, starting from the combination of changes both in the railway infrastructure and in regular timetable, that is the timetable service for passengers. From a theoretical point of view, the selected approach is based on the simulation of railway timetables considering different configurations of the infrastructure; this method allows to take into account all the relevant parameters characterizing the railway operations. The simulation runs on a proprietary software tool, developed within the Politecnico di Torino.

The achieved results identify an infrastructural scenario improving the stability of the line under examination; moreover, looking at the railway capacity, a further contribution to the analysis is produced by creating a new periodic timetable grid, which maximizes the trains per hour capacity.

The increase in capacity, made by infrastructural changes, has led to the creation of the new periodic timetable grid. Such increments are evaluated by considering the reduction of the total travel time compared with the current infrastructural scenario.

# Indice

## Sommari

<b>Sommario</b> .....	<b>3</b>
<b>Abstract</b>  .....	<b>4</b>
<b>Indice</b> .....	<b>5</b>
<b>Sommari</b> .....	<b>5</b>
<b>Indice delle figure</b> .....	<b>8</b>
<b>Indice delle tabelle</b> .....	<b>Errore. Il segnalibro non è definito.</b>
<b>Capitolo 1</b> .....	<b>1</b>
<b>Introduzione</b> .....	<b>1</b>
1.1 Le origini del sistema ferroviario .....	3
1.2 L'avvento e sviluppo in Italia .....	4
1.3 Sistema ferroviario attuale.....	10
<b>Capitolo 2: Servizio Ferroviario Metropolitan Piemontese</b> .....	<b>13</b>
2.1 Inquadramento territoriale.....	13
2.2 Nascita e potenziamento.....	15
2.3 Offerta sfm2 .....	20
<b>Capitolo 3: Capacità ferroviaria</b> .....	<b>23</b>
3.1 Capacità delle reti ferroviarie: definizione.....	24
3.2 Parametri determinanti la capacità di circolazione .....	26
3.2.1 Parametri dell'infrastruttura .....	26
3.2.2 Parametri operativi.....	29

3.3	Stato dell'arte sui metodi d'analisi della capacità ferroviaria .....	29
<b>Capitolo 4: Analisi sulla tratta Torino Pinerolo.....</b>		<b>31</b>
4.1	Metodologia di analisi.....	32
4.1.1	Raccolta dati .....	33
4.1.2	Costruzione modello infrastrutturale .....	35
4.2	Scenari di studio.....	38
4.2.1	Scenario infrastrutturale 1 (Raddoppio Pinerolo-Piscina).....	39
4.2.2	Scenario infrastrutturale 2 (Raddoppio Moncalieri Sangone-Candiolo).....	40
4.2.3	Limitazioni della modellizzazione .....	41
4.3	Elaborazione statistiche su tempi e ritardi.....	42
4.3.1	Algoritmo di fitting .....	45
4.3.2	Ritardo in uscita dal nodo di Torino.....	47
4.3.3	Ritardo in partenza da Pinerolo.....	50
4.3.4	Statistiche sui tempi di sosta nelle località.....	52
4.3.4	Tempi minimi di percorrenza .....	62
<b>Capitolo 5: Offerta di trasporto.....</b>		<b>65</b>
5.1	Modello di esercizio A .....	65
5.2	Modello di esercizio B.....	67
5.3	Modello di esercizio C.....	68
<b>Capitolo 6: Scenari Simulati.....</b>		<b>70</b>
6.1	Simulazione 0 .....	71
6.2	Simulazione 1 .....	72
6.3	Simulazione 2 .....	73

6.4	Simulazione 3 .....	74
6.5	Simulazione 4 .....	75
6.6	Simulazione 5 .....	76
6.7	Simulazione 6 .....	77
<b>Capitolo 7: Analisi dei risultati.....</b>		<b>78</b>
7.1	L'Output.....	78
7.2	Confronto tra gli scenari con Modello di esercizio A .....	79
7.3	Confronto tra gli scenari con Modello di esercizio B.....	81
7.4	Confronto tra il modello di esercizio C e quello "As-is" .....	82
<b>Capitolo 8 Conclusioni .....</b>		<b>84</b>
<b>Bibliografia .....</b>		<b>87</b>
<b>Sitografia .....</b>		<b>89</b>
<b>Ringraziamenti.....</b>		<b>90</b>

## Indice delle figure

Figura 1 Km di rete ferroviaria nel tempo .....	4
Figura 2 Rete ferroviaria nel 1896 .....	6
Figura 1.3 Evoluzione rete ferroviaria elettrificata .....	8
Figura 4 Estensione della rete .....	11
Figura 5 Grafo del Servizio Ferroviario della Regione Piemonte .....	14
Figura 6 Topologia delle prime linee Sfm .....	16
Figura 7 Grafo attuale del Servizio Ferroviario metropolitano .....	17
Figura 8 Topologia Sfm2 .....	20
Figura 9 Linea Sfm2 .....	21
Figura 10 Capacità e affidabilità a confronto (Abril, et al., 2008) .....	25
Figura 11 Distanza di arresto .....	26
Figura 12 Aspetto dei segnali in una sezione isolata .....	27
Figura 13 Aspetto dei segnali in una sezione concatenata .....	28
Figura 14 Inquadramento territoriale della linea Torino Pinerolo .....	31
Figura 15 Esempio di FCL .....	33
Figura 16 Estratto del piano schematico di None .....	34
Figura 17 Esempio ambientazione SASTRE .....	36
Figura 18 Esempio orario grafico .....	38
Figura 19 Grafo infrastruttura attuale .....	39
Figura 20 Grafo raddoppio Pinerolo Piscina .....	40
Figura 21 Grafo raddoppio Moncalieri Candiolo .....	40
Figura 22 CDF Ritardo in uscita dal nodo (fascia di morbida) .....	47
Figura 23 CDF Ritardo in uscita dal nodo (fascia di punta) .....	48
Figura 24 PDF Ritardo in uscita dal nodo .....	49
Figura 25 PDF Ritardo in partenza da Pinerolo .....	50
Figura 26 CFD Ritardo in partenza da Pinerolo .....	51
Figura 27 CDF Tempo di fermata Airasca (morbida) .....	53
Figura 28 CDF Tempo di fermata Airasca (punta) .....	54
Figura 29 PDF Tempo di fermata Airasca .....	55
Figura 30 CDF Tempo di fermata None (morbida) .....	56
Figura 31 CDF Tempo di fermata None (punta) .....	56
Figura 32 PDF Tempo di fermata None .....	57
Figura 33 CDF Tempo di fermata Candiolo (morbida) .....	58
Figura 34 PDF Tempo di fermata Candiolo .....	59
Figura 35 CDF Tempo di fermata Moncalieri (morbida) .....	60
Figura 36 CDF Tempo di fermata Moncalieri (punta) .....	61
Figura 37 PDF Tempo di fermata Moncalieri .....	62
Figura 38 Fermate modello A .....	66
Figura 39 Fermate modello B .....	67
Figura 40 Fermate modello C .....	68
Figura 41 Griglia orario modello C .....	69
Figura 42 Infrastruttura Simulazione 0 .....	71
Figura 43 Orario Grafico Simulazione 0 .....	71
Figura 44 Infrastruttura simulazione 1 .....	72

<i>Figura 45 Orario grafico simulazione1</i> .....	72
<i>Figura 46 Infrastruttura simulazione 2</i> .....	73
<i>Figura 47 Infrastruttura simulazione 3</i> .....	74
<i>Figura 48 Orario grafico simulazione 3</i> .....	74
<i>Figura 49 Infrastruttura simulazione 4</i> .....	75
<i>Figura 50 Orario grafico simulazione 4</i> .....	75
<i>Figura 51 Infrastruttura simulazione 5</i> .....	76
<i>Figura 52 Orario grafico simulazione 5</i> .....	76
<i>Figura 53 Infrastruttura simulazione 6</i> .....	77
<i>Figura 54 Orario grafico simulazione 6</i> .....	77
<i>Figura 55 Output di SASTRE</i> .....	78
<i>Figura 56 Confronto scenario 0, 1 e 2 in direzione Pinerolo</i> .....	79
<i>Figura 57 Confronto scenario 0, 1 e 2 in direzione Torino</i> .....	80
<i>Figura 58 Confronto scenario 3, 4 e 5 in direzione Pinerolo</i> .....	81
<i>Figura 59 Confronto scenario 3, 4 e 5</i> .....	81
<i>Figura 60 Confronto scenario 0 e 6</i> .....	82

# Capitolo 1

## Introduzione

In un contesto mondiale dove si pone sempre più l'attenzione su tematiche ambientali come l'inquinamento atmosferico, i cambiamenti climatici, lo sfruttamento del suolo e rifiuti, l'UE ha stabilito diversi obiettivi per la riduzione degli effetti ambientali del settore dei trasporti. Gli obiettivi relativi al settore dei trasporti concorrono al traguardo complessivo di ridurre le emissioni di gas serra dell'80-95 % entro il 2050.

Vengono individuate tre aree prioritarie di azione:

- aumentare l'efficienza del sistema di trasporto sfruttando al massimo le tecnologie digitali, la tariffazione intelligente e incoraggiando ulteriormente il passaggio a modi di trasporto a basse emissioni;
- accelerare la diffusione di energie o vettori energetici alternativi al solo petrolio, a basse emissioni per i trasporti, quali i biocarburanti avanzati, l'elettricità, l'idrogeno e combustibili sintetici rinnovabili e rimuovere gli ostacoli all'elettrificazione parziale dei trasporti;
- accelerare la transizione verso veicoli a basse e zero emissioni, sebbene saranno necessari ulteriori miglioramenti al motore a combustione interna.

In quest'ottica le città e le autorità locali svolgono un ruolo cruciale nell'attuazione di questa strategia, incoraggiando gli spostamenti in bicicletta e a piedi, trasporti pubblici e bike-sharing e car-sharing / pooling per ridurre la congestione e l'inquinamento.

Focalizzandoci sul trasporto pubblico ed in particolare sul trasporto ferroviario, incoraggiarne l'uso significa offrire un livello di servizio più adeguato agli obiettivi suindicati, in modo da rendere questa modalità di trasporto più competitiva del trasporto su gomma con mezzi privati.

La tesi s'inserisce in questo ambito di studio dei sistemi di trasporto ferroviari, analizzando il potenziamento offerto dalla nuova proposta di RFI (Rete Ferroviaria Italiana, gestore dell'infrastruttura ferroviaria nazionale) nella gestione dei servizi Sfm (Servizio Ferroviario Metropolitano) della città Metropolitana di Torino e proponendo un nuovo modello di esercizio attraverso un'analisi multi-scenario.

In particolare, si propone di studiare la capacità e la stabilità della circolazione ferroviaria della tratta Torino-Pinerolo appartenente alla linea Sfm2, a fronte di modifiche infrastrutturali parziali e mirate.

Lo scopo è di individuare quale scenario migliori la stabilità della linea, riducendo i ritardi per i passeggeri e al contempo potenzi la capacità ferroviaria, aumentando l'offerta di servizio. Trovare il giusto equilibrio tra stabilità e capacità nella realtà si tramuta nel rendere più competitiva questa soluzione di trasporto.

Nel *Capitolo 1* viene presentata un'introduzione al sistema ferroviario non solo in termini di estensione della rete ma anche in termini di innovazioni tecnologiche, le quali hanno comportato un miglioramento delle prestazioni e del comfort per il passeggero.

A seguito della presentazione generale del sistema ferroviario, nel *Capitolo 2* si pone un focus sull'infrastruttura del territorio di cui fa parte il tratto di strada ferrata in esame, il tratto da Torino fino a Pinerolo. Dalla rete ferroviaria Piemontese l'attenzione viene posta sul Servizio Ferroviario Metropolitano, in particolare sulla linea Sfm2 da Chivasso a Pinerolo. Nel *Capitolo 3* viene inquadrato da un punto di vista teorico il problema della valutazione della capacità ferroviaria. In primis si introduce il concetto di capacità ferroviaria ed i molteplici parametri incidenti, successivamente si accenna ai diversi metodi esistenti (analitici, di ottimizzazione e di simulazione).

Facendo riferimento ai concetti teorici esplicitati nel capitolo precedente, nel *Capitolo 4* viene presentata la metodologia messa in atto per l'analisi, presentando il software usato per le simulazioni e il metodo di ricerca degli input. Nel *Capitolo 5* e nel *Capitolo 6* vengono presentati tutti i modelli di esercizio e gli scenari di simulazione trattati. Gli output delle simulazioni sono stati analizzati nel *Capitolo 7* per poi arrivare alle conclusioni sul tema trattato.

## 1.1 Le origini del sistema ferroviario

Dal XIX secolo, in cui compaiono le prime applicazioni dell'energia a vapore applicata alla trazione ferroviaria, si arriva al 3 ottobre 1839, anno di nascita della prima ferrovia italiana. Vi sono state delle innovative premesse tecnologiche che contribuirono in modo determinante alla nascita della ferrovia. Una delle scoperte determinanti per la trazione ferroviaria fu l'applicazione delle rotaie per la riduzione al minimo dell'attrito ruota-rotaia<sup>1</sup>: fu l'ingegnere inglese George Stephenson che arrivò a perfezionare la trazione ferroviaria, utilizzando una rivoluzionaria locomotiva a vapore con il traino su rotaia<sup>2</sup>.

La ferrovia, intesa come Impresa Ferroviaria, nacque in Gran Bretagna per motivazioni strettamente economiche; invero la potente industria mineraria inglese intuì che questo tipo di trasporto sarebbe certamente servito per trasportare maggiori carichi su rotaia, abbassando così i propri costi di trasporto delle materie prime estratte; in mancanza di questa straordinaria invenzione l'industria estrattiva mineraria inglese avrebbe continuato ad utilizzare i cavalli per il traino su rotaie dei materiali estratti, ma sostenendo costi di esercizio per l'estrazione sempre più alti.

La nascita della ferrovia rappresentò la punta di diamante di una serie di invenzioni e di applicazioni dell'energia meccanica sviluppata dalla forza del vapore, e da lì a poco si estese e si sviluppò in altri paesi per soddisfare le sempre crescenti esigenze di trasporto.

Immediatamente si intuì che questa nuova invenzione oltre a trasportare merce, riducendo costi e tempi, poteva far spostare la gente velocemente da una contea all'altra; così entrò in funzione il 27 settembre 1825 da Stockton a Darlington (Scozia) la prima ferrovia al mondo concepita ed adibita per il trasporto di passeggeri, di ben 34 chilometri<sup>3</sup>.

---

<sup>1</sup> Valter GUADAGNO, *Ferrovia ed economia nell'Ottocento post-unitario*, Roma, Edizioni CAFI, 1996.

<sup>2</sup> Rosario VILLARI, *Storia contemporanea*, 1° ed., Roma - Bari, Editori Laterza, 1970, (5° ed., 1984).

<sup>3</sup> Gianni Robert, *Le ferrovie nel mondo*, Milano, Vallardi, 1964

## 1.2 L'avvento e sviluppo in Italia

In Italia la storia ferroviaria iniziò con la faticosa data del 28 gennaio 1836 con la richiesta formale di autorizzazione per lo studio di fattibilità delle linee ferroviarie da Napoli a Manfredonia, che entrò in esercizio successivamente nel 1839: da questo preciso momento iniziò dunque l'avventura ferroviaria italiana<sup>4</sup>; la prima rete ferroviaria sviluppata in Italia fu quella del Regno Sabauda, grazie all'esperienza accumulata da Cavour, che aveva studiato ingegneria in Gran Bretagna, proprio agli albori della ferrovia.

A seguito degli straordinari risultati raggiunti negli altri paesi del mondo con questo rivoluzionario mezzo di trasporto, anche in Italia si radicò sia nell'opinione pubblica, che nella classe politica la convinzione che le risorse finanziarie impiegate dai capitalisti di quei paesi stranieri per la realizzazione di infrastrutture ferroviarie fossero state un ottimo investimento e che la ferrovia fosse stata l'artefice del progresso e dello sviluppo economico di quei Paesi (Tabella 1).

Pur consapevoli che investire nell'infrastruttura ferroviaria fosse un'idea vincente, solamente a partire dall'epoca appena precedente all'unificazione del territorio italiano la rete ferroviaria cominciò ad estendersi e a svilupparsi in modo consistente<sup>5</sup> (Figura 1).

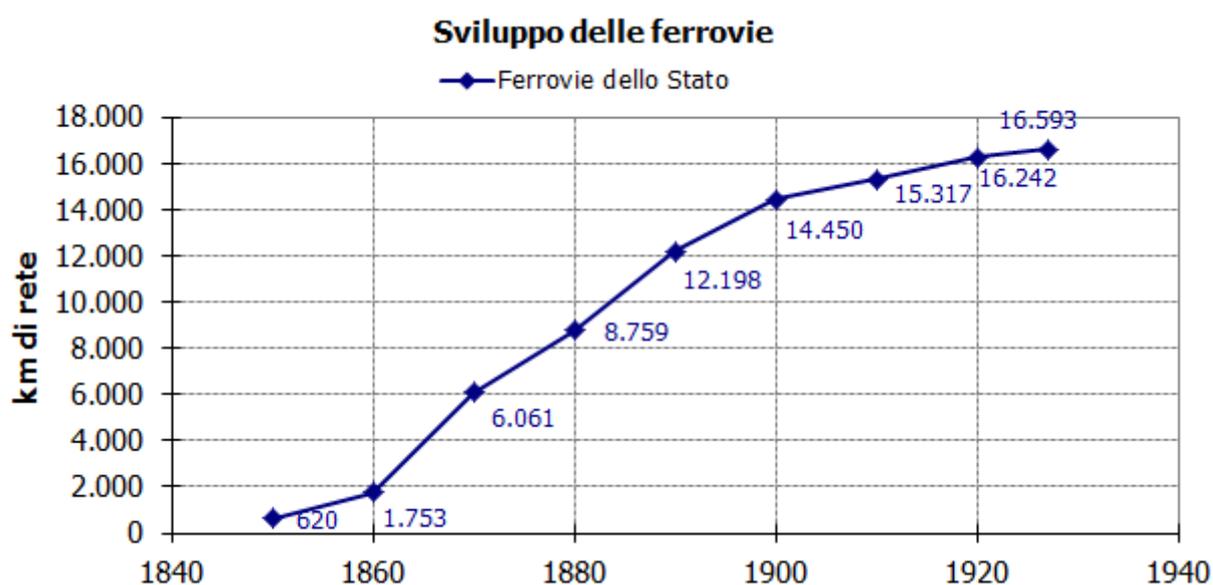


Figura 1 Km di rete ferroviaria nel tempo

<sup>4</sup> Cfr. Italo BRIANO, Storia delle ferrovie in Italia, 1° Vol., Milano, Editore Cavallotti, 1977

<sup>5</sup> Valter GUADAGNO, Ferrovia ed economia nell'Ottocento post-unitario, Roma, Edizioni CAFI, 1996

Tabella 1 Estensione della rete ferroviaria nel 1860

Nazione	Regione	Estensione della ferrovia (Km)
Stati Uniti		49.292
Gran Bretagna		16.787
Germania		11.633
Francia		9.528
Canada		3.359
Spagna		1.918
Italia		1.753
	Piemonte	803
	Lombardo Veneto	500
	Toscana	251
	Lazio	101
	Campania	98
Belgio		1.729
Russia		1.589
Svizzera		1.096

Il periodo delle Grandi Reti ebbe inizio con la Legge dello Stato n° 2279 del 14 maggio 1865 di riordino della materia ferroviaria, ed ebbe termine sostanzialmente con l'approvazione della Legge dello Stato n° 3048 del 27 aprile 1885 delle Convenzioni Ferroviarie<sup>6</sup>.

Lo Stato, durante il periodo postunitario a causa dell'insorgenza di ulteriori difficoltà economiche, per non rinunciare ai propri obiettivi legati all'estensione della rete ferroviaria, con la Legge dello Stato sulle Concessioni Private del 1865 operò in modo tale da affidare alle Società Private in Concessione la progettazione, la realizzazione, e la gestione delle linee ferroviarie<sup>7</sup>. Le Società Private furono però sottoposte indirettamente attraverso il regime della Concessione Privata allo stretto e regolatore controllo dello Stato italiano.

Con la Legge Speciale n° 3.048 del 27 aprile 1885 delle Convenzioni Ferroviarie lo Stato, dopo venti anni dalla legge delle Concessioni Private, operando una oculata scelta di politica economica, affidò e concentrò la gestione della rete ferroviaria italiana nelle mani di poche società private, dotate di una certa dimensione e importanza economica<sup>8</sup>.

Con la legge delle Convenzioni Ferroviarie, attuando la spartizione geografica del territorio italiano secondo un mero criterio fisico longitudinale (e non secondo un mero criterio regionalistico), si configurarono due grandi reti ferroviarie, con accanto altre realtà di modesta entità.

<sup>6</sup> Valter GUADAGNO, *Ferrovia ed economia nell'Ottocento post-unitario*, Roma, Edizioni CAFI, 1996

<sup>7</sup> [http://www.provincia.torino.gov.it/culturamateriale/doc/\\_doc.htm](http://www.provincia.torino.gov.it/culturamateriale/doc/_doc.htm)

<sup>8</sup> [http://www.provincia.torino.gov.it/culturamateriale/doc/\\_doc.htm](http://www.provincia.torino.gov.it/culturamateriale/doc/_doc.htm)

Secondo l'annuario statistico del 1898, pubblicato dal ministero dell'Agricoltura, Industria e Commercio, le ferrovie d'Italia comprese quelle di proprietà privata, erano ripartite come segue<sup>9</sup> (Figura2):

- Rete Mediterranea: km 5.765
- Rete Adriatica: km 5.602
- Reti private: km 1.583
- Rete "Strade Ferrate Sicule": km 1.093 (+ Sicula occidentale 188; Palermo Corleone km 68; Circum-Etna km 113)
- Rete Sarda: Reale km 414; Private km 621

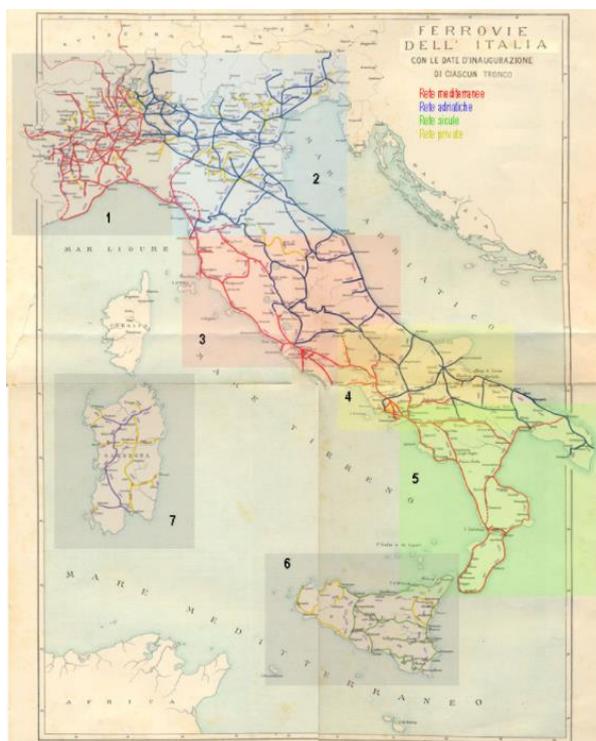


Figura 2 Rete ferroviaria nel 1896

Il periodo delle Convenzioni Ferroviarie ebbe termine con la Legge dello Stato n° 137 del 22 Aprile 1905 istituente l'Azienda Autonoma delle Ferrovie dello Stato<sup>10</sup>.

<sup>9</sup> Il Secolo XIX - Vallardi, 1900

<sup>10</sup> <http://www.fondazionefs.it>

Il successivo progredire del trasporto su ferro fu l'adozione del sistema di trazione elettrico, durante il periodo fascista. L'Italia prima in Europa<sup>11</sup>, cercò di sostituire la trazione a vapore in uso sulle proprie ferrovie con quella elettrica allo scopo di migliorare il comfort ed eliminare il fastidio che la polvere di carbone arrecava ai viaggiatori. Migliorando le prestazioni e la comodità del viaggio aumentarono anche i fruitori del servizio (Tabella 2).

Tabella 1.2 Andamento del traffico ferroviario 1905 – 1930 (Azienda Autonoma FS)

<b>TRAFFICO FERROVIARIO (IN MILIONI)</b>			
<i>Periodo Quinquennio (in esame)</i>	<i>Viaggiatori / Km (Treni Viaggiatori)</i>	<i>Tonnellate / Km (Treni Merci)</i>	<i>Estensione della rete ferroviaria (Km)</i>
<u>1905</u>	4.575	4.997	17.078
<u>1910</u>	4.973	6.318	18.090
<u>1915</u>	5.028	8.874	19.652
<u>1920</u>	6.430	8.620	20.385
<u>1925</u>	8.600	12.352	21.106

La motivazione principale per la quale si diede impulso alla trazione ferroviaria elettrica fu l'idea che avrebbe permesso un risparmio energetico considerato a quei tempi fenomenale, permettendo inoltre ulteriori economie di scala dovute al fatto che sarebbero stati possibili maggiori carichi di traino, possibilità fino ad allora non contemplate.

Sostanzialmente furono tre le fasi di attuazione della programmazione della elettrificazione ferroviaria in Italia<sup>12</sup>.

La 1° Fase Sperimentale partì nel 1890 con l'entrata in esercizio della Firenze - Fiesole, prima linea tranviaria in Europa, a cui seguì un'ampia sperimentazione di più sistemi di trazione elettrica a partire dal 1898, fino al 1906 con la scelta della trazione elettrica a CA Trifase.

La 2° Fase della trazione elettrica a CA Trifase a frequenza fissa prese inizio nel 1906 con l'attuazione del Programma Quinquennale di elettrificazione della rete ferroviaria italiana,

<sup>11</sup> Al tempo non esisteva alcun esempio di trazione elettrica ferroviaria: le esperienze erano infatti limitate alla trazione tranviaria che, nata in Europa nel 1879 con modeste applicazioni, ebbe un grandissimo sviluppo negli Stati Uniti d'America negli anni seguenti, tornando quindi di rimbalzo nel Vecchio Continente.

<sup>12</sup> Francesco Murolo, dispense 'Appunti di trazione elettrica' 2015.

e si concluse nel 1921 con l'estensione della elettrificazione alla rete ferroviaria principale. Questo sistema di trazione elettrica, contrariamente ai propositi iniziali, fu anche per assurdo l'ostacolo primario al diffondersi della elettrificazione su vasta scala della rete ferroviaria italiana. Infatti, i vantaggi, in seguito, si dimostrarono assai labili rispetto ai costi elevatissimi sostenuti per gli impianti fissi di produzione e trasformazione dell'energia; questo portò il sistema Trifase a CA ad operare con scarsi risultati economici<sup>13</sup>.

La 3° Fase della trazione elettrica a CC prese inizio nella seconda decade del 900', durante la quale furono molteplici gli esperimenti sulla trazione elettrica. Merita di essere menzionato uno dei primi tentativi sperimentali sulla linea Torino - Lanzo - Ceres nel 1920; il quale venne condotto adottando la trazione elettrica a CC a 4.000 Volt, la cui captazione dell'energia elettrica avveniva tramite un filo conduttore aereo, mentre la chiusura del circuito elettrico di ritorno avveniva sulle due rotaie in diretto contatto col suolo. Una tensione così alta della linea di contatto venne adottata per permettere ai motori una trazionabilità di convogli molto lunghi e pesanti<sup>14</sup>.

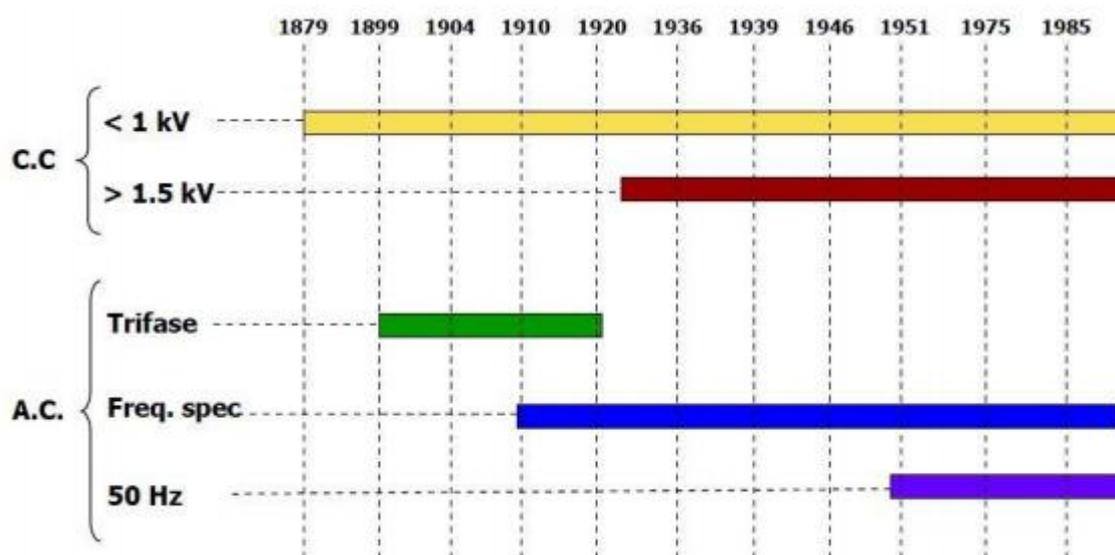


Figura 1.3 Evoluzione rete ferroviaria elettrificata

Il sistema a corrente continua si è diffuso rapidamente, a differenza degli altri sistemi che sono caduti in disuso (Figura 3), soprattutto in funzione delle economie che esso consente grazie alla sua elevatissima tensione, infatti esso viene adottato ogni volta che si debba

<sup>13</sup> Mario LORIA, Storia della trazione elettrica ferroviaria in Italia, Firenze, Giunti-Barbèra, 1971

<sup>14</sup> Federico PERINETTI, Piccola enciclopedia dei treni, Milano, Massimo Editore, 1974

introdurre ex novo la trazione elettrica in una rete ferroviaria che ne fosse ancora sprovvista.

I vantaggi di questo sistema non sono rappresentati solo dalle economie negli impianti fissi, ma possiamo aggiungere:

- enorme facilità con cui è possibile graduare la velocità di marcia, diversamente alla trazione elettrica trifase a CA, dove erano possibili tecnicamente solo poche e fisse velocità di marcia;
- maggiori velocità di marcia consentite;
- rendimenti maggiori, quasi sei volte superiore a quello delle locomotive a vapore;
- minore manutenzione.

### 1.3 Sistema ferroviario attuale

Per quanto riguarda l'Italia, ad oggi la Rete Ferroviaria Italiana (RFI) comprende 16.782 km di linea, e prevede una configurazione sostanzialmente longitudinale, con le linee principali che si sviluppano nel senso Nord-Sud. Le linee che compongono la rete sono classificate in base alle loro caratteristiche in:

- linee fondamentali, caratterizzate da un'alta densità di traffico e da una elevata qualità dell'infrastruttura, comprendono le direttrici internazionali e gli assi di collegamento fra le principali città italiane;
- linee complementari, con minori livelli di densità di traffico, costituiscono la maglia di collegamento nell'ambito dei bacini regionali e connettono fittamente tra loro le direttrici principali;
- linee di nodo, che si sviluppano all'interno di grandi zone di scambio e collegamento tra linee fondamentali e complementari situate nell'ambito di aree metropolitane.

Un ulteriore distinzione viene fatta tra le linee convenzionali e le linee AV/AC (alta velocità e alta capacità).

Nelle seguenti tabelle vengono riportati i dati relativi al 31 dicembre 2020, che descrivono la Rete Ferroviaria Italiana (*Figura 4*):

Classificazione	
Linee fondamentali	6.468 km
Linee complementari	9.364 km
Linee di nodo	950 km

TIPOLOGIA	
Linea a doppio binario	7.732 km
Linea a semplice binario	9.050 km

ALIMENTAZIONE	
Linee elettrificate	12.065 km
Linee a doppio binario	7.656 km
Linee a semplice binario	4.409 km
Linee non elettrificate (diesel)	4.717 km

TECNOLOGIE DI PROTEZIONE MARCIA	
Sistemi di telecomando della circolazione	13.321 km
SCMT, per il controllo della marcia del treno	12.653 km
SSC, per il supporto alla guida	3.325 km
ERTMS, per l'interoperabilità	782 km
GSM-R, per la telecomunicazione mobile	11.633 km



Figura 4 Estensione della rete

È importante sottolineare che la rete ferroviaria è di proprietà del gestore dell'infrastruttura e l'operatore utilizza la rete per erogare il servizio.

I gestori dell'infrastruttura ferroviaria sono quegli organismi o imprese incaricati in particolare della creazione e della manutenzione dell'infrastruttura ferroviaria, compresa eventualmente anche la gestione dei sistemi di controllo e di sicurezza della stessa.

Gli operatori sono tutte le imprese ferroviarie che erogano il loro servizio (passeggeri o merci) sulla rete ferroviaria nazionale; i quali devono essere in possesso di licenza rilasciata dal Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti.

Oggi, il principale attore nel trasporto dei passeggeri in Italia è Trenitalia, che fa parte del gruppo Ferrovie dello Stato. Trenitalia è organizzata in 2 parti per il trasporto dei passeggeri, tramite il servizio a media lunga percorrenza e il servizio regionale con accordi stipulati con le compagnie regionali locali.

A partire dalla liberalizzazione delle compagnie ferroviarie in Italia, cominciata diversi anni fa e finalizzata nel 2012, ItaloTreno è diventata il principale concorrente di Trenitalia nel trasporto dei passeggeri per il servizio a lunga percorrenza.

## Capitolo 2: Servizio Ferroviario Metropolitano Piemontese

Il Servizio Ferroviario Metropolitano di Torino (SFM) è il servizio ferroviario suburbano dell'area metropolitana torinese, coordinato dall'Agenzia Mobilità Metropolitana Torino e finanziato dalla Regione Piemonte.

Il servizio è composto da 8 linee, per un'estensione di circa 500 km, 365 collegamenti giornalieri e 93 stazioni collegate. Il SFM offre un collegamento fra le diverse zone del Torinese e delle contigue province di Cuneo e Asti, permettendo coincidenze con gli altri servizi presenti sul territorio.

### 2.1 Inquadramento territoriale

La rete ferroviaria piemontese si estende per circa 2.660 km. La gran parte (circa il 79%) è di competenza di Rete Ferroviaria Italiana S.p.A., come stabilito dal D.lgs. n. 112/1998; mentre la Regione ha competenze dirette sulle linee affidate a GTT.

La rete RFI in Piemonte è composta da (*Figura 5*):

- 1895 km di linee di cui: 556 km fondamentali, 1255 km complementari, 84 km di nodo.
- 226 km di linea AV.
- 40% di linee a doppio binario.
- 71% di linee elettrificate.

In Piemonte le linee ferroviarie affidate a soggetti diversi dalle Ferrovie dello Stato S.p.A., sono la ferrovia Torino-Ceres e la ferrovia Settimo-Pont (ferrovia Canavesana) che sono state conferite alla Regione ai sensi dell'art. 8 del D.lgs. 422/1997.

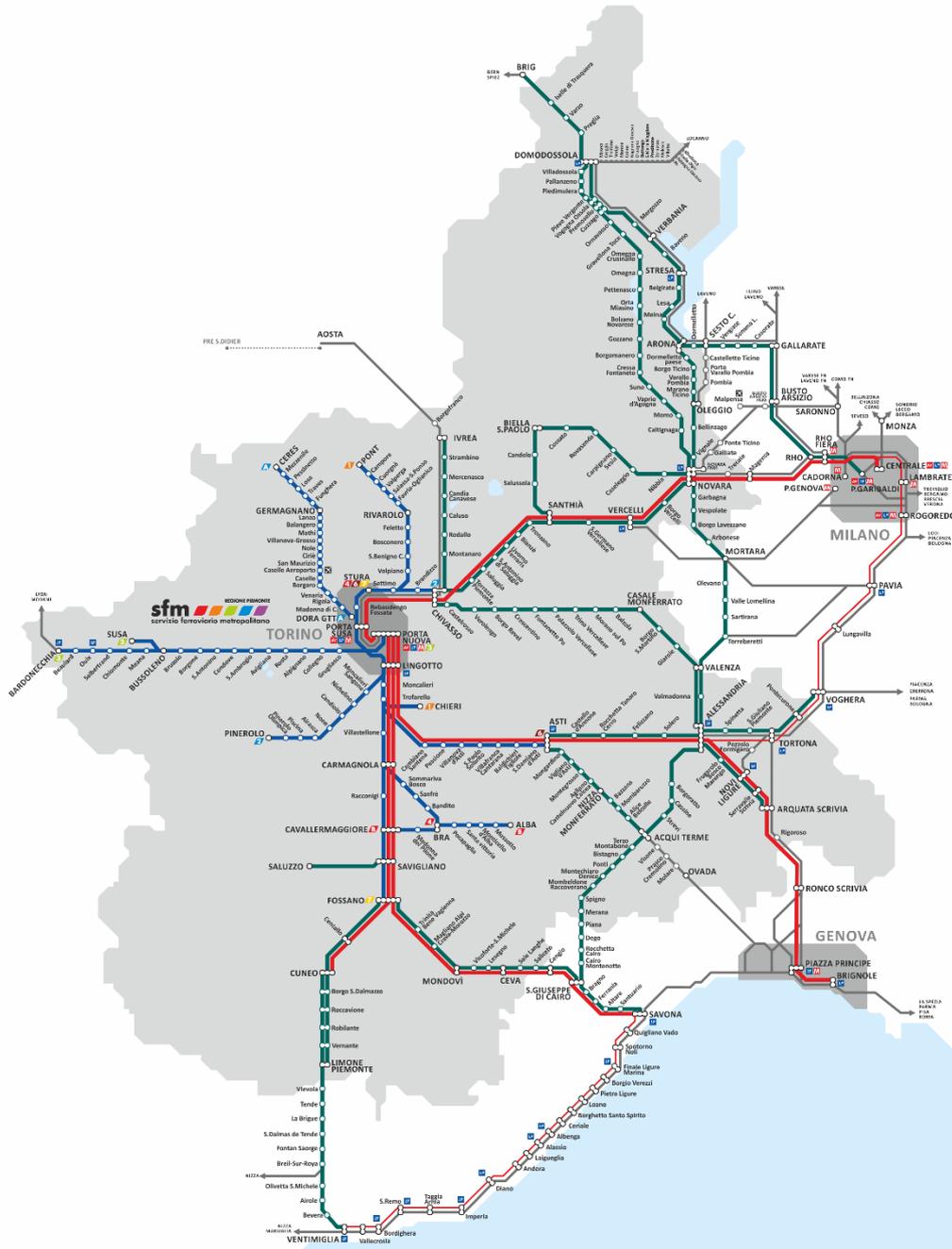


Figura 5 Grafo del Servizio Ferroviario della Regione Piemonte

In Piemonte il sistema ferroviario passeggeri è parte sostanziale del sistema gerarchico del trasporto pubblico locale. Sulla rete i servizi offerti sono:

- il Servizio Ferroviario Regionale - SFR, di collegamento intra-bacino, dei vari bacini con il capoluogo regionale (Torino) e con i capoluoghi delle Regioni confinanti (Aosta, Milano, Genova);
- il Servizio Ferroviario Metropolitano – SFM.

## 2.2 Nascita e potenziamento

Il Servizio Ferroviario Metropolitano è stato concepito avendo alle spalle delle decisioni importanti, assunte in precedenza, maturate negli anni '80-'90 e poi arrivate a compimento negli anni 2000.

Tra le scelte più rilevanti è necessario citare i lavori di potenziamento della strada ferrata che hanno consentito di quadruplicare i binari esistenti (termine tecnico "quadruplicamento in asse"), collocando quindi altri due binari a fianco degli esistenti.

Questo nuovo progetto incorporava diversi contenuti riassunti di seguito: un nuovo collegamento diretto tra le stazioni Lingotto e Porta Susa, "il Passante", con una galleria che non interferiva con gli altri tracciati; il quadruplicamento del tratto Porta Susa – Torino Stura, con una nuova stazione sotterranea di Porta Susa, potenziata ed avvicinata al corso Vittorio Emanuele, stazione che ormai conosciamo realizzata. Infine, due nuove fermate in città, Zappata e Rebaudengo e l'allacciamento della linea Torino-Aeroporto-Ceres alla rete ferroviaria principale.

Altra scelta fondamentale per il concepimento del Servizio Ferroviario metropolitano fu l'integrazione tariffaria "Formula".

In precedenza, ciascun vettore stabiliva la propria tariffa e se il passeggero aveva la necessità di cambiare percorso quotidianamente, era obbligato ad acquistare abbonamenti diversi. Con "Formula" si è arrivati ad avere un solo abbonamento che vale per tutti i vettori, ottenendo quindi una grande semplificazione anche in termini tariffari.

Un altro passo rilevante, che ha aperto significativamente la strada al Servizio Ferroviario Metropolitano, è stato la fondazione dell'Agenzia della Mobilità Piemontese, concepita e studiata negli anni '90 e che ha preso il volo negli anni 2000.

L'Agenzia è l'ente responsabile per la Pubblica Amministrazione della mobilità collettiva su tutto il territorio piemontese; costituita nel 2003, è un consorzio di enti locali attualmente ripartiti come segue:

- Regione Piemonte: 25%;
- Enti del Bacino della Città di Metropolitana di Torino: 36% di cui 25% Città di Torino;
- Enti del Bacino Sud: 13%;
- Enti del Bacino Nord-Est: 15%;
- Enti del bacino Sud-Est: 11%.

Dal momento della fondazione dell'Agenzia seguirono una serie di studi e programmazioni delle tracce orarie, che nel 2009 portarono finalmente alla sperimentazione delle prime 5 linee embrionali del futuro Servizio Ferroviario Metropolitano (Figura 6). Un aspetto qualificante del progetto è il servizio cadenzato: ogni 30 minuti nelle ore di punta, 60 minuti in ora di morbida.



Figura 6 Topologia delle prime linee Sfm

Dal 4 dicembre del 2012, data di inaugurazione del Servizio ferroviario Metropolitano, ad oggi le linee in fruizione sono 8, con 93 stazioni servite (Figura 7). Le linee sono caratterizzate da servizio orario con cadenzamento ogni 30 minuti in ora di punta e 60 minuti in ora di morbida; il servizio nei giorni festivi segue un cadenzamento biorario.

Il network del servizio ferroviario metropolitano:

- Linea Sfm1 Pont-Rivarolo-Chieri;
- Linea Sfm2 Pinerolo-Chivasso;
- Linea SfmA Torino-Aeroporto-Ceres;
- Linea Sfm3 Torino-Susa/Bardonecchia;
- Linea Sfm4 Torino-Bra;
- Linea SfmB Cavallermaggiore-Bra-Alba;
- Linea Sfm6 Torino-Asti;
- Linea Sfm7 Torino-Fossano.



Figura 7 Grafo attuale del Servizio Ferroviario metropolitano

A partire dal 2020 le linee Sfm sono gestite da Trenitalia, la quale si è aggiudicata la gara decennale bandita dall'Agenzia della Mobilità Piemontese. Trenitalia nella proposta ha offerto più collegamenti, maggiori servizi e massima integrazione ferro-gomma a beneficio dei pendolari, insieme ad un concreto rinnovo della flotta entro il 2022.

Nello specifico, la proposta si articola in due fasi:

- l'attivazione dello scenario Base a partire dal 2020 (posticipata a causa della situazione pandemica);
- l'attivazione dello scenario Evolutivo a partire dal 2022.

Lo scenario Base prevede il miglioramento del modello attuale del Servizio Ferroviario Metropolitano. Le caratteristiche più salienti di questo scenario riguardano il potenziamento delle 7 linee esistenti, servendo 99 stazioni, offrendo 468 collegamenti giornalieri (rispetto a quelli dello scenario attuale, pari a 332), fino ad 1 treno cadenzato a frequenza ogni 7'/8' in ora di punta all'interno del passante di Torino, il tutto grazie all'introduzione di una nuova linea SFM8 Settimo-Torino Lingotto, che collegherà direttamente la decima città del Piemonte sino alla parte sud del capoluogo di Torino. A completamento dello sviluppo del modello, è prevista la riattivazione del servizio ferroviario da Pinerolo a Torre Pellice (progetto attualmente sospeso) come estensione naturale della linea SFM2 Pinerolo-Chivasso. Inoltre, è prevista l'attivazione in anticipo, con servizi bus sostitutivi, l'SFM5 Orbassano (Ospedale San Luigi) - Torino Stura, che verrà successivamente effettuata con servizi ferroviari nello scenario evolutivo.

Lo scenario base di Trenitalia presenta un incremento dell'offerta di servizi ferroviari fino a 7 milioni di Treni-km ovvero circa il 13,3% in più rispetto ai livelli 2016.

Lo scenario evolutivo, grazie ad un upgrade infrastrutturale, prevede 8 linee, 101 stazioni servite, 420 collegamenti giornalieri, 1 treno ogni 5' in ora di punta all'interno del passante di Torino, per un totale di 22 treni all'ora in ambedue i sensi di marcia, ed una flotta a regime, a partire dal 2024, di 55 convogli tra ROCK (29) – POP (9) – Jazz (17). L'apertura della interconnessione di Corso Grosseto consentirà il prolungamento a Germagnano delle linee

SFM4 e SFM7 provenienti dal cuneese generando di fatto un sistema perfettamente cadenzato sull'Aeroporto di Caselle "Sandro Pertini" e garantendo una frequenza combinata a 30'. Allo stesso modo la linea SFM6 da Asti e la linea SFM3 proveniente da Modane Bardonecchia saranno prolungate verso lo scalo internazionale "Sandro Pertini". Questa riprogrammazione consentirà di connettere aree turistiche di interesse internazionale come Langhe, Roero, Monferrato, le residenze Reali dei Savoia a Torino, Venaria, Moncalieri, Racconigi (tutte patrimonio dell'Unesco) o le rinomate Montagne Olimpiche con l'aeroporto. Il capoluogo piemontese sarà quindi connesso allo scalo con 8 treni l'ora ovvero un servizio ogni 15' per direzione. Tutti i servizi descritti fermeranno anche nelle nuove stazioni di Torino Dora, Torino Zappata, Grosseto e Juventus Stadium (Rigola Stadio). Verrà infine attivata la nuova linea SFM5 Orbassano-Torino Stura con le nuove fermate di Orbassano San Luigi, Borgata Quaglia-Le Gru e Torino San Paolo.

## 2.3 Offerta sfm2

La linea Sfm2 (Figura 8) è quel tratto di strada ferrata che va da Chivasso fino a Pinerolo, passando per il nodo di Torino.

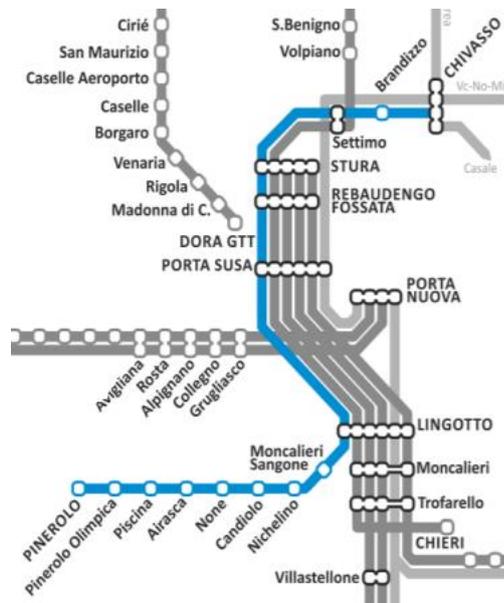


Figura 8 Topologia Sfm2

La linea è interamente elettrificata a CC, partendo 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 progetto per una ferrovia che unisse Pinerolo a Torino prese forma nella primavera del 1845 con la costituzione di una società promotrice per la sua costruzione.

Vennero quindi esaminati alcuni progetti di collegamento: via Buriasco-Vigone e Pancalieri, di 44 km, via Piossasco-Orbassano, di 33 km, e infine quello passante per Candiolo, None ed Airasca. Venne scelto l'ultimo per usufruire di un tratto già esistente della linea Torino-Genova con inserimento nel comune di Moncalieri a ridosso dal ponte sul Sangone, conosciuto come Bivio Moncalieri Sangone.

L'inaugurazione del tratto da Torino fino a Pinerolo avvenne il 27 luglio 1854.

Il 21 dicembre 1882 fu inaugurata la ferrovia Pinerolo-Torre Pellice, che costituiva il naturale prolungamento della linea<sup>15</sup>; il servizio offerto su tale linea venne soppresso nel 2012 e da allora le corse su rotaia sono state sostituite da un servizio su gomma.

Il 15 ottobre 1909 venne attivato il raddoppio del binario fra il bivio Sangone e la stazione di Moncalieri Sangone<sup>16</sup>, escludendo il tratto da Moncalieri Sangone fino a Pinerolo che sinora è a singolo binario.

Dal dicembre 2012 è stata attivata sulla linea Torino-Pinerolo la nuova linea SFM 2 (Figura 9), la quale attualmente prevede un cadenzamento semi-orario in ora di punta e orario in ora di morbida, per un totale di 44 treni nei giorni feriali. Nei giorni festivi il servizio offerto è bi-orario, cioè con un treno ogni due ore.



Figura 9 Linea Sfm2

Il modello di esercizio, inteso come programmazione delle tracce orarie occupate dai treni che circolano sulla linea<sup>17</sup> (Figura 10), assieme alle specifiche tecniche riguardanti il distanziamento spaziale e temporale ed ai perditempo consentiti per le operazioni di incrocio e precedenza, presenti a Candiolo e a Piscina di Pinerolo, determina il tempo di percorrenza effettivo del singolo treno che è di 1 ora e 14 minuti per l'intera tratta da Chivasso a Pinerolo.

<sup>15</sup> Ferrovia Torino-Pinerolo - Wikipedia

<sup>16</sup> Ferrovie dello Stato, *Ordine di Servizio n. 305*, 1909

<sup>17</sup> A titolo d'esempio nell'orario grafico vengono visualizzati gli ultimi due treni in entrambe le direzioni.

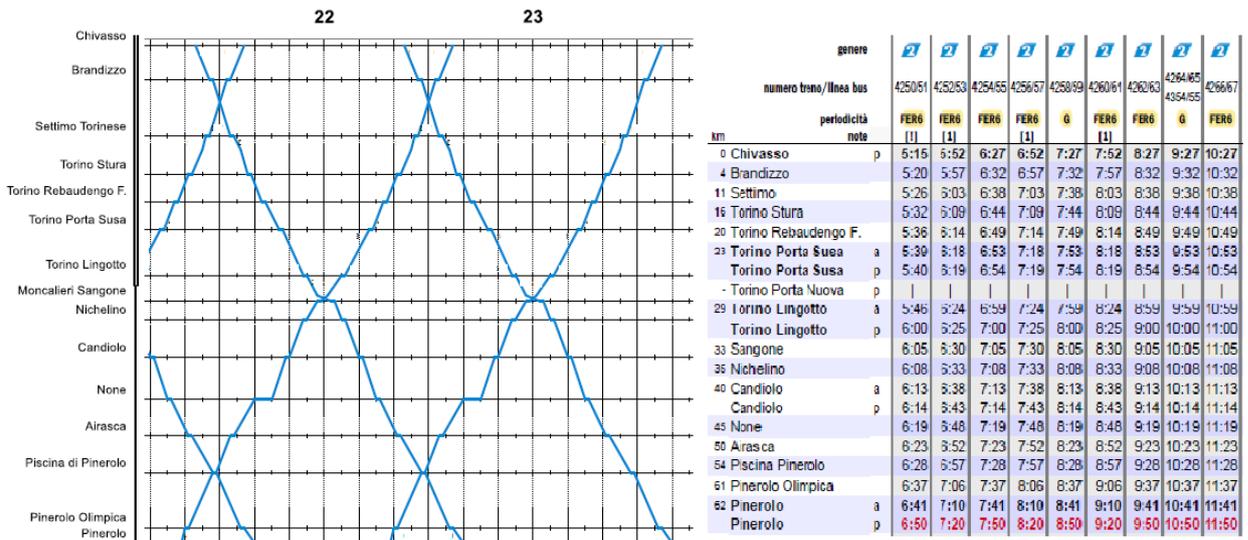


Figura 10 Orario grafico e orario tabellare

Analizzando la domanda, basata sull'analisi delle serie storiche delle frequentazioni registrate da Trenitalia, essa risulta essere piuttosto piatta, tipica di una linea che corre in un territorio non molto dinamico e di un'offerta ferroviaria già quasi completa e non soggetta a rilevanti innovazioni anche a causa della capacità dell'infrastruttura ferroviaria. Elemento che non migliora l'attrattività del servizio sono i ritardi presenti nel tratto a singolo binario.

## Capitolo 3: Capacità ferroviaria

Le principali caratteristiche che devono contraddistinguere il trasporto ferroviario, considerando il carattere di servizio pubblico e l'importanza che esso assume nel quadro delle attività economiche nazionali, sono le seguenti<sup>18</sup>:

- Rispondenza alle esigenze di traffico: come ogni sistema di trasporto, il sistema ferroviario deve essere in grado di soddisfare la domanda di spostamenti su tutto il territorio di sua competenza;
- Sicurezza d'esercizio: la sicurezza è un requisito fondamentale a cui si fa riferimento durante le fasi di progettazione, manutenzione e organizzazione delle infrastrutture, dei veicoli e dei servizi ferroviari.
- Capacità: ossia il volume limite di traffico, in termini di mezzi, passeggeri o merci, che può essere gestito, nel rispetto di prefissati livelli di servizio.
- Regolarità: la regolarità della circolazione e la regolarità del servizio costituiscono una necessità oltre che una finalità nell'organizzazione del trasporto ferroviario.
- Rapidità dei servizi: la velocità è un altro dei caratteri funzionali della ferrovia, che assume un'importanza sempre più elevata all'aumentare della distanza. La riduzione dei tempi di percorrenza è infatti una delle peculiarità che rende più appetibile un sistema di trasporto. Essa trova la sua piena realizzazione sulle nuove linee ad alta velocità AV.
- Costo del viaggio: il servizio ferroviario è un servizio pubblico, dev'essere pertanto accessibile alla maggioranza della popolazione, anche in termini di costi del viaggio. È importante dunque trovare il giusto compromesso tra i costi di gestione e i ricavi, in modo da rendere il sistema economicamente sostenibile e garantirne, al tempo stesso, l'accessibilità alla maggior parte delle persone.

Fra questi elementi sopra elencati esistono forti legami di dipendenza: ad esempio garantire velocità e livelli di regolarità elevati non consente di avere valori elevati di capacità, con un conseguente innalzamento del costo del viaggio. Sarà il gestore della rete a stabilire quali aspetti prediligere per ogni linea, in funzione del servizio che vuole offrire.

---

<sup>18</sup> Ciuffini Francesca, *Orario ferroviario. Integrazione e connettività*, CIFI, 2019

### 3.1 Capacità delle reti ferroviarie: definizione

Ad una rete, definita come insieme di rami e nodi, viene assegnato uno stato circolatorio rappresentato dall'insieme dei flussi o correnti delle unità di traffico (treni) che circolano su ciascun ramo e attraverso ciascun nodo. Circostrivendo, per comodità, l'analisi ai rami (il concetto può essere esteso con alcuni adattamenti anche ai nodi), il flusso può essere descritto in termini di:

- *Portata  $q$*  che rappresenta il numero di treni che transitano in un punto generico del ramo nell'unità di tempo (treni/ora o treni/giorno);
- *Densità  $K$*  che rappresenta invece il numero di treni presenti, in un istante generico, su un tratto unitario del ramo (treni/km).

Queste due grandezze hanno un limite massimo denominato capacità  $C$ , che rappresenta il carico massimo sopportabile dal ramo. Esprimendo il flusso in termini di portata, la capacità rappresenterà quindi il numero massimo dei treni che possono transitare in un punto generico del ramo nell'unità di tempo. Non è possibile assegnare un valore assoluto di capacità ad una linea ferroviaria, bensì una pluralità di valori dipendenti da alcuni variabili (fiche UIC 406: Capacity as such does not exist. Railway infrastructure capacity depends on the way it is utilised).

È necessario inoltre distinguere i concetti di capacità teorica e capacità reale (*Figura 11*) (Abril, et al., 2008):

- *La capacità teorica* rappresenta il numero di circolazioni possibili nell'unità di tempo, assumendo delle condizioni imperturbate: treni della stessa categoria, con stesse velocità e con il minimo distanziamento possibile. Il valore così determinato rappresenta il limite superiore, il massimo valore di capacità ottenibile. La capacità teorica tuttavia non trova alcun fine pratico dal momento che è calcolata considerando condizioni di esercizio ideali: la minima perturbazione del flusso infatti metterebbe in crisi l'intero traffico sulla linea con un effetto a catena.

- La *capacità reale* rappresenta invece il volume limite di traffico che può essere effettivamente gestito su una linea, a determinati livelli di regolarità, considerando le condizioni reali d'esercizio (circolazione mista, ritardi, rallentamenti, ecc.). Di solito è circa il 60-75% della capacità teorica.

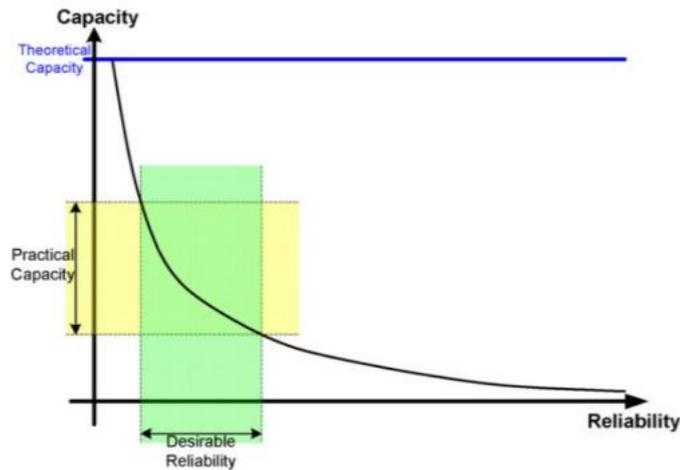


Figura 11 Capacità e affidabilità a confronto (Abril, et al., 2008)

È inoltre opportuno introdurre il concetto di *capacità utilizzata*, ossia la quota parte della capacità reale effettivamente usata, cioè il volume di traffico effettivo che si configura sulla rete. La capacità utilizzata è minore o tutt'al più uguale alla capacità reale.

La differenza tra la capacità reale e la capacità utilizzata prende il nome di *capacità residua*, che rappresenta la capacità disponibile per poter soddisfare nuova domanda.

## 3.2 Parametri determinanti la capacità di circolazione

Con l'espressione parametri di circolazione, in ferrovia, si intende definire l'insieme dei provvedimenti tecnici ed organizzativi necessari per assicurare il corretto distanziamento fra i treni.

I parametri principali che influiscono sulla determinazione della capacità ferroviaria sono i parametri dell'infrastruttura e i parametri operativi (Abril, et al., 2008; Landex, Kaas, & Nielsen, Methods to estimate railway capacity and passenger delays, 2008; KFH Group, 2013).

### 3.2.1 Parametri dell'infrastruttura

Occorre garantire che un treno non possa raggiungere un altro che lo precede nello stesso senso e, sulle linee a semplice binario, che due treni viaggianti in senso opposto, non possano essere inoltrati, contemporaneamente, sullo stesso tratto di linea (UIC, 2013).

A tal scopo, il distanziamento tra due treni dovrà dunque essere tale da lasciare, tra un treno e l'altro, uno spazio sufficiente a consentire l'arresto del treno (*Figura 12*) che segue in caso di improvviso arresto del treno che lo precede. Tale spazio dovrà tenere conto dello spazio  $S_r$  percorso durante il tempo di reazione  $t_r$ , che va dall'istante della percezione della necessità di arrestarsi all'istante di piena efficienza del sistema frenante, dello spazio di frenatura  $S_a$  necessario al treno per arrestarsi, e di un franco di sicurezza  $S_o$ .

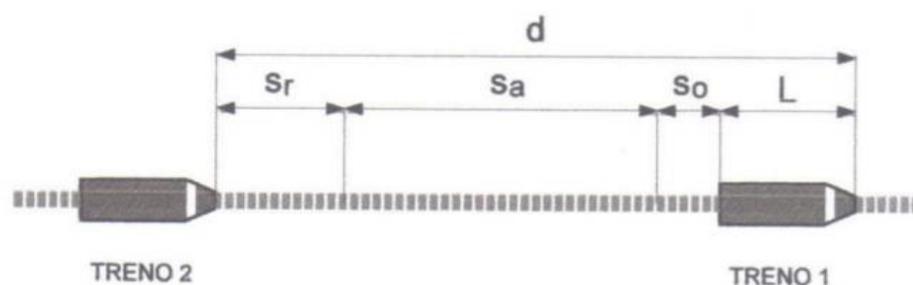


Figura 12 Distanza di arresto

La distanza tra la testa dei due treni risulta pertanto pari a:

$$d = S_r + S_a + S_o + L = v * t_r + \frac{v^2}{2a} + S_o + L$$

### Sezione di blocco

I sistemi di circolazione attualmente in uso prevedono il “distanziamento a spazio” (il distanziamento a tempo non è praticamente più utilizzato). Nel “distanziamento a spazio” la linea ferroviaria è suddivisa in tratti di lunghezza prefissata, denominati sezioni di blocco: la regola fondamentale per la sicurezza della circolazione è che può esserci un solo treno, contemporaneamente, in ogni sezione di blocco (Pier Luigi Guida, Eugenio Milizia, *Dizionario ferroviario. Movimento, Circolazione, Impianti di segnalamento e sicurezza*).

In questo caso la distanza di sicurezza da mantenere tra due treni sarà maggiore del valore minimo precedentemente calcolato  $d = S_r + S_a + S_o + L = v * t_r + \frac{v^2}{2a} + S_o + L$

e dipenderà dalla lunghezza delle sezioni di blocco. Questo perché i sistemi di “distanziamento a spazio” basati sulla sezione di blocco sono in grado di rilevare lo stato di occupazione di una sezione ma non la posizione effettiva del treno su quella sezione. La posizione del treno è dunque determinata con un errore pari all’intera estensione della sezione di blocco e, di conseguenza, la distanza minima tra due treni che si susseguono dipenderà proprio dalla lunghezza delle sezioni di blocco.

All’inizio di ogni sezione di blocco è posizionato un segnale di prima categoria che informa riguardo lo stato di occupazione della sezione (*Figura 13*): segnale rosso indica che la sezione è occupata, segnale verde indica che la sezione è invece libera e possiamo procedere nella marcia. A sua volta il segnale di prima categoria dev’essere preceduto da un segnale di avviso, che per l’appunto avvisi il macchinista che la sezione successiva è occupata e che quindi deve arrestare il treno prima di entrarvi: un segnale di avviso giallo indica che la sezione successiva è occupata (precede dunque un segnale di prima categoria rosso), un segnale di avviso verde indica invece che possiamo procedere nella marcia.



Figura 13 Aspetto dei segnali in una sezione isolata

La distanza fra il segnale di avviso e segnale di prima categoria dev'essere, ovviamente, almeno pari alla distanza di arresto del treno che necessita della maggiore distanza di arresto tra quelli che percorrono la linea, in modo da poter arrestare il treno prima di giungere sulla sezione occupata.

In generale, la capacità di una linea ferroviaria aumenta al diminuire della lunghezza delle sezioni di blocco. In particolare, la capacità è massima utilizzando sezioni di blocco di lunghezza pari alla distanza di arresto (del treno che necessita della maggiore distanza di arresto tra quelli che percorrono la linea). In questo caso la funzione di avviso può essere svolta dal segnale di prima categoria della sezione precedente e si parla di sezioni di blocco concatenate (*Figura 14*).



*Figura 14* Aspetto dei segnali in una sezione concatenata

I segnali pertanto non saranno più a 2 aspetti come per le sezioni isolate, bensì a tre aspetti (rosso, giallo e verde). Proprio per la maggiore capacità garantita le sezioni concatenate vengono realizzate sulle linee ad alto traffico, mentre su quelle a medio e scarso traffico si utilizzano sezioni isolate, con lunghezza che può arrivare anche a 15/20 km, in virtù del loro costo ridotto: sono necessari infatti meno impianti di segnalamento.

In Italia le Ferrovie dello Stato (FS) hanno stabilito la lunghezza delle sezioni di blocco, nel caso concatenato, generalmente, pari a 1350 metri per le linee non AV (valore calcolato in base alla distanza di arresto di treni che viaggiano ai 160 Km/h, stimata, con opportuni margini di sicurezza, tra i 1200 e i 1400 metri) e di 1800 metri per le linee ad alta velocità AV/AC.

Altro aspetto da non trascurare è il numero di binari di linea, poiché a seconda che la linea sia a singolo o doppio binario, cambia il metodo di valutazione della capacità.

### **3.2.2 Parametri operativi**

#### **Modello di esercizio**

Il modello di esercizio, inteso come programmazione delle tracce orarie occupate dai treni che circolano sulla linea, assieme alle specifiche tecniche riguardanti il distanziamento spaziale e temporale ed ai perditempo consentiti per le operazioni di incrocio e precedenza, determina il tempo di percorrenza effettivo del singolo treno.

#### **Caratteristiche del materiale rotabile**

Le caratteristiche di trazione e di frenatura, nonché la composizione, determinano la marcia del treno, il conseguente spazio di frenatura richiesto e pertanto il distanziamento e la velocità pratica consentiti.

### **3.3 Stato dell'arte sui metodi d'analisi della capacità ferroviaria**

In letteratura sono presenti diverse tecniche di analisi e metodologie di calcolo della capacità e si possono suddividere in tre macro-categorie (Hansen & Pachl, 2014):

- Sintetiche: usano espressioni di tipo deterministico, ossia non sono in esse contenute variabili che possano cambiare stato assumendo valori prefissati durante l'arco temporale di riferimento; dal punto di vista matematico sono equazioni con incognite tra loro indipendenti; sono definite anche Statiche;
- Analitiche: usano espressioni di tipo probabilistico; dal punto di vista matematico sono insiemi di equazioni con incognite dipendenti una dall'altra; sono definite anche Dinamiche;
- Analogiche: si suddividono ulteriormente in metodi asincroni (vi rientrano i metodi che prevedono l'ottimizzazione di una o più variabili) e metodi sincroni (vi trovano collocazione i metodi di simulazione della circolazione); ad esempio i metodi di ottimizzazione sono basati su modelli operativi che cercano di calcolare e minimizzare i ritardi nella circolazione eterotachica, mentre i metodi di simulazione rappresentano gli stati evolutivi della ricerca più avanzati e vengono sovente utilizzati anche per la validazione dei risultati degli altri metodi.

Una delle prime formulazioni adottate dalle Ferrovie dello Stato (1986), usata per calcolare la capacità, considera i tempi di percorrenza e i tempi di sosta per sole due classi di treni. Essa è stata superata da una nuova espressione adottata da Rete Ferroviaria Italiana (RFI), la quale è basata sulla Fiche UIC 405.1 e consente di calcolare sia la capacità teorica, sia quella pratica di linea.

Il metodo utilizzato dalle ferrovie tedesche (1974), che utilizza la cosiddetta Formula DB, è basata su funzioni di calcolo di tipo probabilistico dell'intervallo medio di distanziamento fra i treni, considerando soltanto due classi di velocità.

Petersen (1974), presenta un metodo analitico per le linee a singolo binario ipotizzando una distribuzione uniforme delle partenze dei treni e tre diverse classi di velocità. Cascetta e Nuzzolo (1980), hanno implementato tale metodo per la determinazione della capacità pratica di una linea con l'introduzione del calcolo dei ritardi e dell'effettiva disponibilità di binari d'incrocio e precedenza. Il metodo proposto dall'UIC (1983), determina la capacità di circolazione facendo riferimento alla sezione più critica; attraverso l'introduzione di un tempo aggiuntivo, funzione del numero di sezioni di blocco e di un margine d'incremento (calcolato attraverso la teoria delle code), il metodo considera il livello di servizio effettivo. Una nuova formulazione UIC (1996) permette di porre in relazione capacità di circolazione e qualità del servizio. Corriere (1984), introduce la variabile di comportamento dei convogli riguardo alla velocità programmata, la propagazione dei ritardi e la circolazione eterotachica, fornendo così un contributo fondamentale al calcolo della capacità pratica. Infine, Genovesi e Ronzino (2006), basandosi su quanto definito da Corriere, introducono il perditempo dovuto alle fermate d'orario ed il coefficiente di stabilità su una linea ferroviaria calcolandone la capacità teorica.

L'articolo che suscita più interesse ed è più coerente con l'analisi che andremo a svolgere è la trattazione di Coviello (2015), il quale 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. 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.

## Capitolo 4: Analisi sulla tratta Torino Pinerolo

Lo studio sulla viene focalizzato sul tratto della linea Sfm2 che va dal deviativo estremo Moncalieri Sangone fino a Pinerolo (Figura 15). La tratta interamente elettrificata e dotata di SCMT è lunga 30,5 chilometri, di cui 29,7 km sono caratterizzati da binario singolo con punti di incrocio possibili a Candiolo, None, Airasca e Piscina.

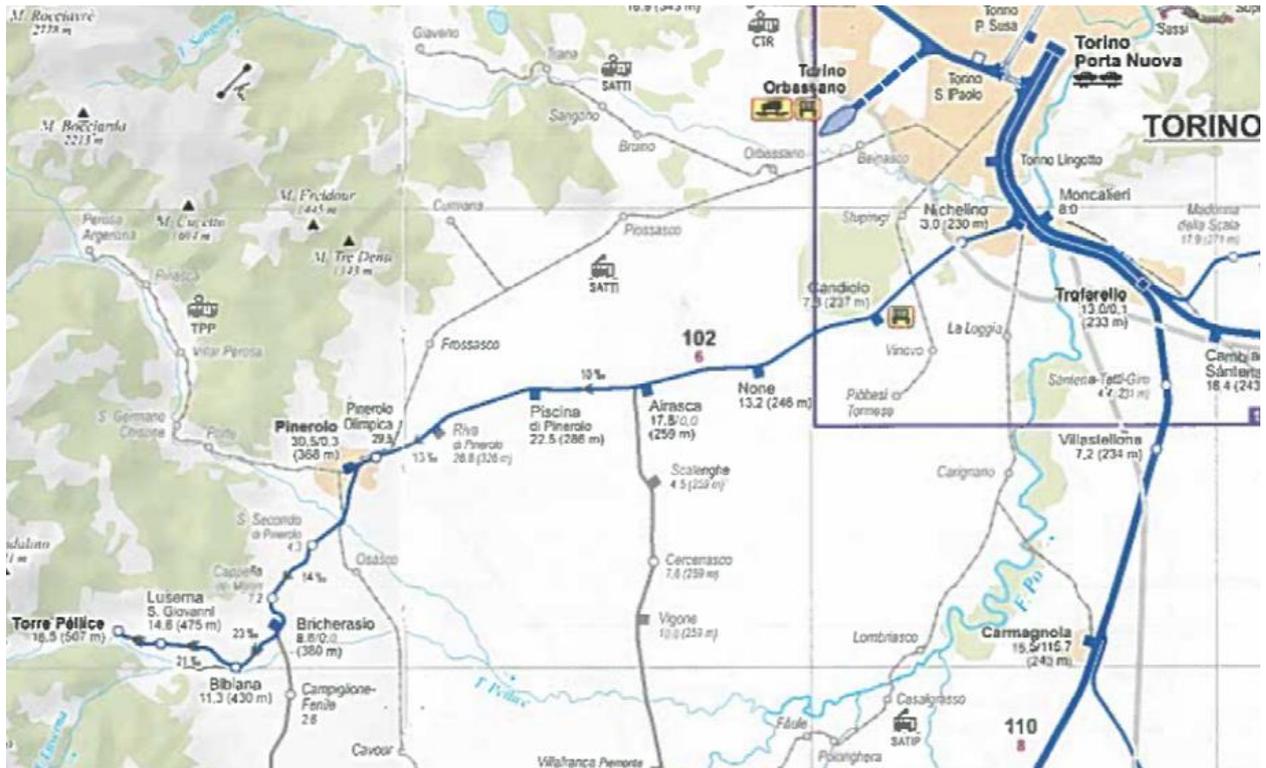


Figura 15 Inquadramento territoriale della linea Torino Pinerolo

La velocità massima ammessa sulla tratta (rango B) è elevata, essendo pari a 135 km/h per quasi tutto il tragitto; fanno solo eccezione la curva di innesto sulla Torino-Savona da Moncalieri Sangone a Bivio Sangone con limite di 60 km/h e l'ultimo tratto da due chilometri prima della fermata Pinerolo Olimpica a Pinerolo con limite di 90 km/h.

Binari	Velocità max (rango B)	Progressiva chilometrica	Località
II	60	0,000	Bivio Sangone
II	60	0,739	Moncalieri Sangone
I	120	3,035	Nichelino
I	135	7,822	Candiolo
I	135	13,199	None
I	135	17,828	Airasca
I	135	22,460	Piscina di Pinerolo
I	90	29,533	Pinerolo Olimpica
I	30	30,479	Pinerolo

*Tabella 3 Caratteristiche del tracciato*

L'attenzione viene posta sul tracciato a binario singolo, essendo fonte di possibili ritardi rispetto all'orario programmato e di una probabile causa di propagazione del ritardo.

Lo scopo del presente studio è quello di indagare, sia qualitativamente che quantitativamente, i possibili benefici riguardanti il servizio passeggeri apportati da alcuni miglioramenti infrastrutturali, altresì di proporre un nuovo cadenzamento che permetta di aumentare l'offerta proposta sulla tratta Torino Pinerolo.

## **4.1 Metodologia di analisi**

Per valutare gli incrementi di capacità prodotti dagli interventi infrastrutturali è stato utilizzato un metodo su formulazioni analitiche.

La prima fase del lavoro è stata quella di raccogliere tutti i dati e informazioni utili per il raggiungimento degli obiettivi.

I dati sono stati analizzati ed elaborati al fine di trovare le variabili stocastiche che caratterizzano il servizio offerto sulla tratta. A seguire, attraverso lo studio dei dati e osservando attentamente il territorio su cui è inserito il tracciato, sono stati definiti due tipi di modifiche infrastrutturali possibili.

Successivamente si è costruito il modello infrastrutturale sul software SASTRE e sono state inserite le griglie di cadenzamento; a valle della verifica sull'effettiva fattibilità, si è passati alla simulazione del modello di esercizio ferroviario in presenza di variabili stocastiche. Infine, gli output delle simulazioni vengono analizzati per trarre le conclusioni.

#### 4.1.1 Raccolta dati

I dati relativi alle caratteristiche dell'infrastruttura sono stati acquisiti a partire da documenti tecnici ed elaborati progettuali di RFI, alcuni dei quali sono disponibili sul web mentre altri sono stati messi a disposizione in via confidenziale.

I documenti ai quali si è attinti per raccogliere informazioni tecniche sono:

- Fascicolo Circolazione Linea (FCL);
- Profili di linea;
- PGOS;
- Piani schematici.

Il fascicolo di circolazione linea (FCL) è un documento che racchiude tutte le norme di carattere generale e specifiche dell'Orario di Servizio, contenente le caratteristiche delle linee e altre informazioni di carattere operativo. Ciascun FCL (Figura 16) è pertanto una raccolta di Fascicoli Linea, relativi al compartimento di appartenenza.

Grado di frenatura	Velocità max km/h DIRETTA BIN. SINISTRA				Grado di frenatura	Velocità max km/h DIRAMATA BIN. SINISTRA				Progr. Chilom.	LOCALITA' DI SERVIZIO	Velocità max km/h DIRAMATA BIN.				Grado di frenatura	Velocità max km/h DIRETTA BIN. DESTRA/ILLEGALE				Grado di frenatura
	A	B	C	P		A	B	C	P			A	B	C	P		A	B	C	P	
I	30	30	30	30						0,00	<b>TORINO P.N.</b> Dev. U.						30	30	30	30	I
	100	105	115	130						7,93	<b>TO. ORB. F. SUD</b>	30									
					III	30	30	—	—	7,93	<b>TO. ORB.F.CONTAINERS</b>										
					III	30	30	—	—	6,59	<b>TO. ORB. F. ARRIVI</b> DEV.ESTR.TO ORBASSANO	80	80	—	—						
						140	150	150	150	1,57	<b>TORINO S. PAOLO</b>	140	150								
						90	90	90	90	1,00	Cinque	90	90								

Figura 16 Esempio di FCL

Il profilo di linea è un documento in cui è riportato il Tracciato di una linea ferroviaria con le relative caratteristiche fisiche: Pendenza, Raggio di curvatura, gallerie, ponti, fabbricati viaggiatori e altri elementi salienti.

La Prefazione Generale all'Orario di Servizio (PGOS) comprende le norme generali relative all'esercizio del materiale rotabile: numerazione e composizione dei treni merci e viaggiatori, prestazioni delle locomotive, frenatura, velocità massime ammesse ed in particolare i simboli convenzionali per la lettura di Fascicoli di circolazione linea.

Il piano schematico è la rappresentazione di tutti gli enti di un piazzale di stazione (*Figura 17*), non in scala. È un documento che mette in risalto tutti gli elementi fondamentali per l'esercizio ferroviario (binari, scambi, dispositivi di sicurezza, segnali e molto altro).

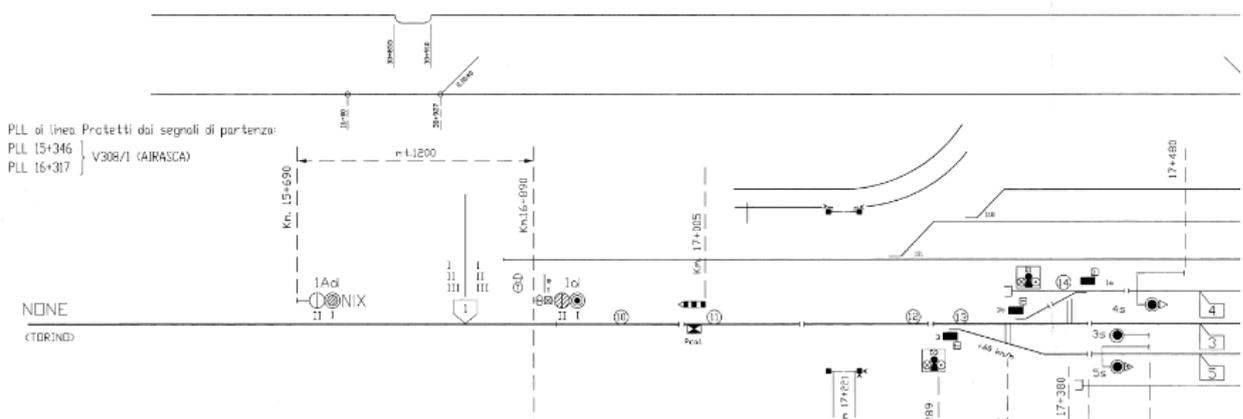


Figura 17 Estratto del piano schematico di None

I dati relativi alla circolazione dei treni attinenti al tratto ferroviario in esame sono stati prelevati dalla Piattaforma Integrata di Circolazione (PIC).

Il PIC è la piattaforma informatica di RFI ad uso delle imprese per la gestione dei dati di esercizio; oltre a controllare la marcia di un treno, con riferimento all'orario programmato, si effettua la verifica del controllo statistico circa le cause di ritardo sistematico.

Il sistema riceve in automatico i dati programmati dagli applicativi di supporto alla progettazione dell'orario e i dati reali dai sistemi tecnologici di campo presenti sulle linee e negli impianti. In particolare, sono rilevati con le seguenti modalità:

- l'orario di arrivo come orario di occupazione del circuito di binario (CdB) di stazionamento dove il treno è ricevuto; l'orario di partenza come orario di occupazione del segnale di partenza;
- l'orario di transito come differenza tra orario di occupazione del segnale di partenza e orario di occupazione del circuito di binario di stazionamento.

In particolare, attraverso la Piattaforma sono stati scaricati i dati sul Circolato storico, cioè tutte le informazioni su quanto fosse stato programmato e su quanto sia poi accaduto realmente per ciò che concerne la circolazione.

La sezione presa in considerazione per analizzare lo storico è stata quella dei 'Prospetti di stazione'. Infatti, inserendo una data specifica e una stazione è possibile visualizzare la tabella di marcia reale, con indicazione sui ritardi/anticipi in arrivo e in partenza della stazione o fermata selezionata.

I dati sperimentali utilizzati per la successiva analisi fanno riferimento ai 'Prospetti di stazione' di ogni singola stazione e fermata della tratta Torino Pinerolo e sono stati selezionati i giorni infrasettimanali del mese di Ottobre 2020, avendo cura di non considerare i giorni in cui vi era uno sciopero.

#### **4.1.2 Costruzione modello infrastrutturale**

Successivamente alla raccolta dei dati si è provveduto alla costruzione dei modelli infrastrutturali. Il software scelto per la costruzione e analisi dei modelli è il software SASTRE (Simulazione ed Analisi Sistemi di Trasporto su Rotaie) sviluppato al Politecnico di Torino presso il DIATI (Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del territorio e delle Infrastrutture).

SASTRE si basa su un modello matematico per la modellizzazione, l'analisi e la simulazione dei sistemi ferroviari strutturato su tre livelli: *LInfra*, *SimEnv* e *AnOpt*. Il passaggio tra i livelli è gestito in maniera automatica da SASTRE, grazie ad opportune interfacce di conversione virtualmente invisibili all'utente.

Il livello *LInfra* è dedicato all'editing della topologia infrastrutturale. Con topologia infrastrutturale si intende la disposizione spaziale dei vari enti materiali o immateriali che caratterizzano l'infrastruttura. In tale livello il modello non lavora ancora con una struttura a grafo, bensì con una "lista di enti" definiti singolarmente e privi - in generale - di correlazioni reciproche.

Nella pratica, è stata costruita la topologia (*Figura 18*), 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;
- sistema di segnalamento;
- sistema di controllo;
- sistema di alimentazione elettrica.



*Figura 18 Esempio ambientazione SASTRE*

Nel livello *SimEnv* viene implementato il modello microscopico di simulazione ed analisi principale. In questo livello ritroviamo tutti gli enti precedentemente definiti che vengono ora “calati” in una struttura a grafo diretto, definito ovviamente in prima istanza dalla topologia dei binari.

Nell’ultimo livello *AnOpt* viene implementato un modello microscopico semplificato ed aggregato ottimizzato per l’analisi del sistema e l’implementazione di algoritmi di scheduling, dedicati alla programmazione dell’esercizio (*timetabling*).

Dopo aver chiuso la topologia del modello *LInfra* ed essere passati al livello *SimEnv*, con la conseguente costruzione nel grafo, si è provveduto all’inserimento del timetable del modello di servizio attualmente in fruizione.

Effettuando una prima simulazione e analizzando i dati simulati e i tempi minimi di percorrenza si è passati alla costruzione di una nuova griglia di cadenzamento, a partire da quella reale. Dopo aver verificato 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...) sono introdotte le perturbazioni stocastiche.

Le perturbazioni rappresentano le variabilità all’interno dell’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.

Al fine di ottenere una discreta mole di dati che permetta di avere un database più realistico possibile, cioè che includa un buon numero di possibili stati della realtà (ritardi), vengono lanciate 30 simulazioni per ciascuno scenario analizzato.

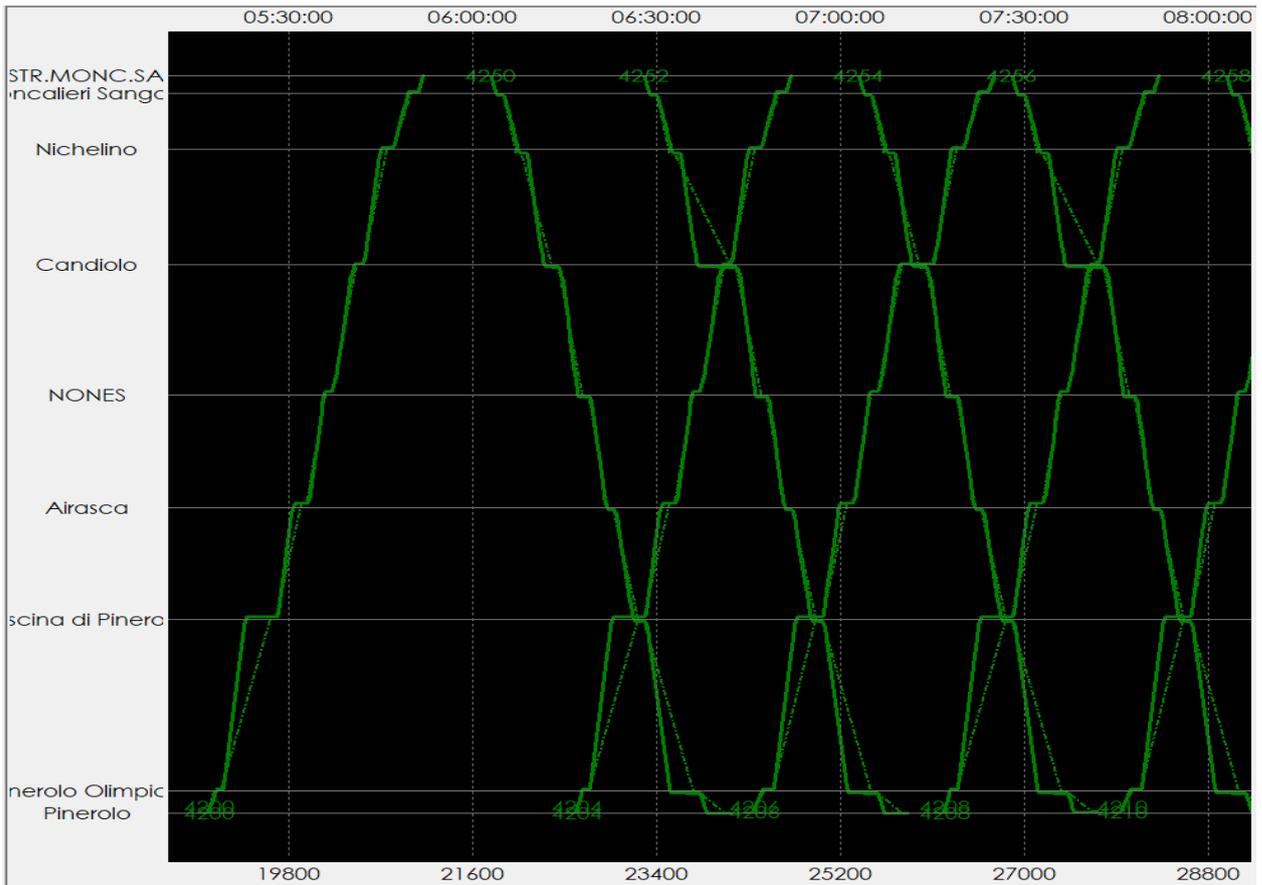


Figura 19 Esempio orario grafico

Con il modello *AnOpt* è possibile visualizzare l'output delle simulazioni sia in formato tabellare che in formato grafico (Figura 19), nel quale le linee tratto-punto rappresentano le tracce orario schedate, le linee continue quelle simulate.

## 4.2 Scenari di studio

Come affermato in precedenza, a fronte di modifiche infrastrutturali si propone di valutare la stabilità e la capacità del tratto che va da Torino fino a Pinerolo (Figura 20).

Per consentire un aumento della capacità e quindi un possibile miglioramento del servizio in termini di stabilità e di treni/h si pensa ad un raddoppio del tratto a singolo binario.

Storicamente il raddoppio della tratta in esame è stato spesso al vertice di dibattiti politici e tecnici; infatti ITALFERR, per conto di RFI, nel 2011 aveva già predisposto il progetto definitivo per il raddoppio dell'intera linea a singolo binario.

La realizzazione dell'intervento avrebbe portato un netto miglioramento al servizio della linea sfm2 con una diminuzione dei tempi di percorrenza e una migliore gestione delle perturbazioni. Inoltre, sarebbe stato accompagnato dalla soppressione dei 28 passaggi a livello presenti sulla linea.

La stima dei costi effettuati da ITALFERR si aggirava intorno ai 360 milioni di euro, dovuti anche alla scelta di procedere all'interramento della stazione di Nichelino. Infatti, fu proprio il costo che portò ad un sostanziale abbandono del progetto.

Data l'entità degli investimenti necessari per il raddoppio completo della linea si è deciso di non considerare il raddoppio intero ma di procedere cercando una soluzione economicamente più sostenibile, con il solo raddoppio di una parte del tracciato (raddoppio selettivo).

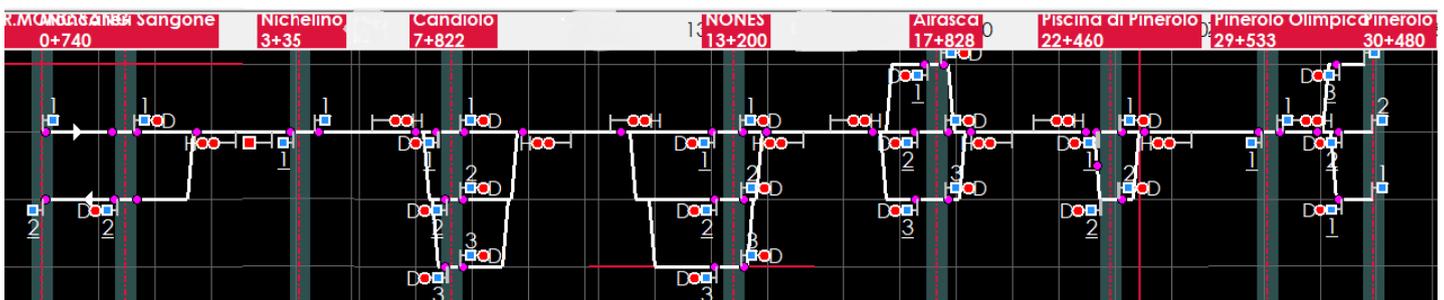


Figura 20 Grafo infrastruttura attuale

#### 4.2.1 Scenario infrastrutturale 1 (Raddoppio Pinerolo-Piscina)

Il raddoppio selettivo porta, anche se in forma minore, vantaggi analoghi al raddoppio totale della linea. Seguendo l'attuale conformazione del servizio, i treni incrociano a Piscina e, in ora di punta, a Candiolo. Dal momento che un raddoppio sulla tratta di Candiolo interessa meno treni e comporta l'intervento sull'area urbana di Nichelino, si ipotizza che la tratta migliore su cui operare sia quella compresa tra Pinerolo e Piscina (Figura 21)

(eventualmente fino ad Airasca o None). Con un raddoppio parziale su tale tratta si avrebbe una maggiore libertà nella programmazione del sistema cadenzato per cui sarebbe possibile ad esempio portare il secondo punto di incrocio a None (dove, a differenza di Candiolo, si può effettuare l'incrocio in contemporanea).

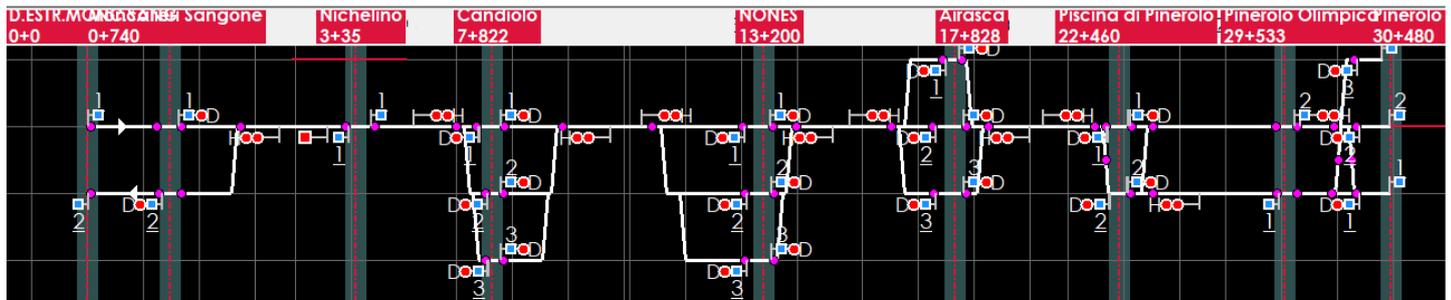


Figura 21 Grafo raddoppio Pinerolo Piscina

#### 4.2.2 Scenario infrastrutturale 2 (Raddoppio Moncalieri Sangone-Candiolo)

Effettuare il raddoppio a partire da Sangone fino a Candiolo (Figura 22) o None è più facilmente

gestibile da parte del gestore dell'infrastruttura (si ha un solo passaggio da semplice a doppio binario invece che due), migliora sicuramente l'affidabilità della linea e può eliminare i tempi di incrocio a Candiolo, tuttavia non permette di modificare il punto di incrocio a Piscina.

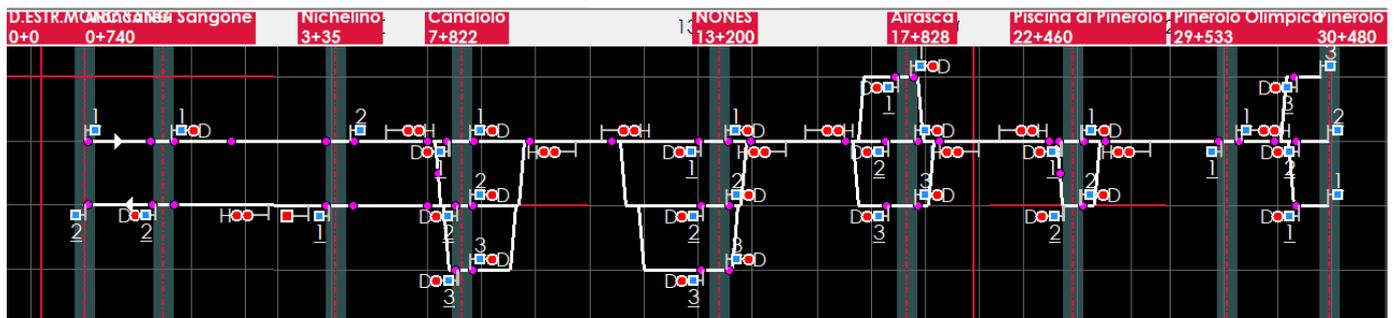


Figura 22 Grafo raddoppio Moncalieri Candiolo

## 4.2.3 Limitazioni della modellizzazione

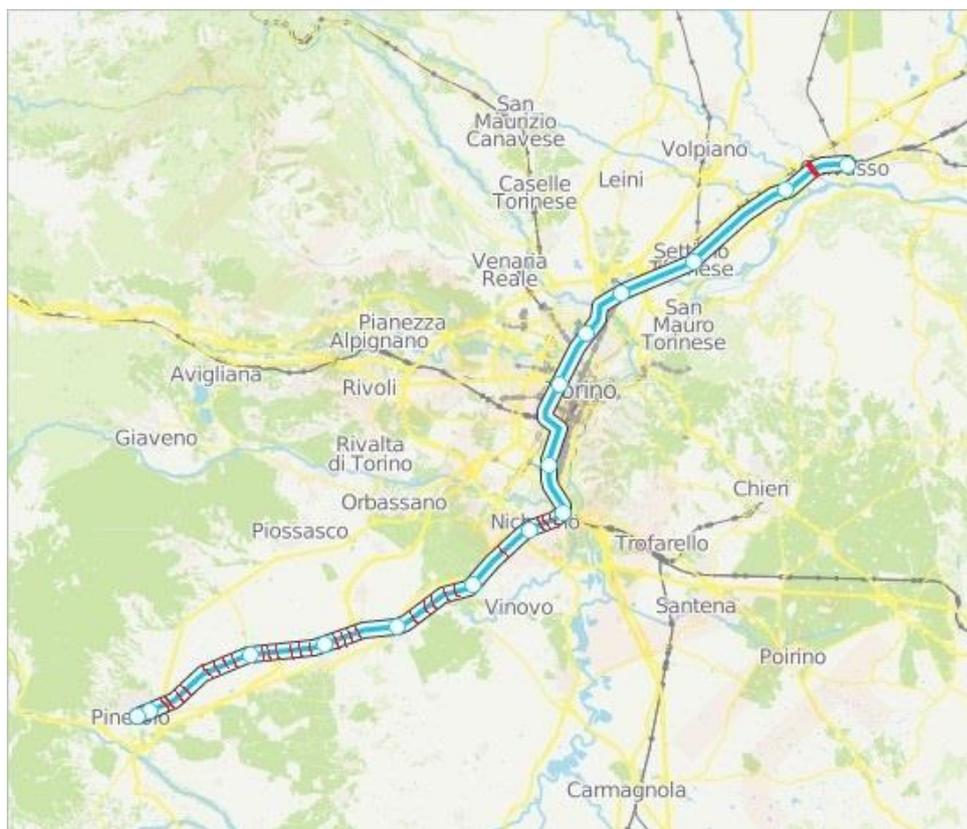
Le limitazioni di cui risente la simulazione sono principalmente dovute alla modellizzazione dell'infrastruttura.

L'intera linea 2 del Servizio ferroviario metropolitano è attraversata da ben 28 P.L.A (passaggi a livello ad azionamento automatico) (Figura 23); il treno stesso aziona l'abbassamento delle barriere durante la sua corsa facendo scattare appositi apparati, nello specifico il blocco elettrico conta-assi, posto lungo la linea.

Progressive chilometriche	LOCALITA' DI SERVIZIO	INDICAZIONI DI SERVIZIO E PROTEZIONE P.L.	Progressive chilometriche	LOCALITA' DI SERVIZIO	INDICAZIONI DI SERVIZIO E PROTEZIONE P.L.
0,739	<b>Moncalieri Sangone</b>		17,828	<b>Airasca</b>	
1,095	P.L.	Seg. prot. Moncalieri Sangone	18,216	P.L.	Segn. Part. Airasca
2,253	P.L.A.	Seg. Part. Moncalieri Sangone	18,787	P.L.A.	Segn. Part. Airasca
2,989	P.L.A.	Seg. Part. Moncalieri Sangone	19,374	P.L.A.	Segn. Part. Airasca
3,035	Nichelino		20,656	P.L.A.	Segn. Km. 20.580 - Disp. Com. Km. 18+348
5,806	P.L.A.	Disp. Com. Km. 4.381 (1)	21,422	P.L.A.	Segn. Km. 20.580 - Disp. Com. Km. 18+348
7,822	<b>Candiolo</b>		21,833	P.L.	Segn. Prot. Piscina
7,929	P.L.	Seg. prot. Candiolo	22,460	<b>Piscina di Pinerolo</b>	
8,801	P.L.	Seg. part. Candiolo	22,563	P.L.	Segn.prot. Piscina P.
9,447	P.L.A.	Seg. part. Candiolo	23,128	P.L.	Segn.part. Piscina P.
10,324	P.L.A.	Seg. part. Candiolo	24,274	P.L.A.	Segn.part. Piscina P.
12,615	P.L.	Seg.prot. None	24,642	P.L.A.	Segn.part. Piscina P.
13,199	None		25,419	P.L.A.	Segn.part. Piscina P.
13,472	P.L.	Seg. part. None	25,844	P.L.A.	Segn.part. Piscina P.
15,346	P.L.A.	Seg. part. None	26,757	P.L.A.	Segn. Km. 26.700 - Disp. Com. Km. 23.100
16,317	P.L.A.	Seg. part. None	27,605	P.L.A.	Segn. Km. 26.700 - Disp. Com. Km. 23.100
17,221	P.L.	Seg. prot. Airasca	29,533	<i>Pinerolo Olimpica</i>	
17,828	<b>Airasca</b>		30,479	<b>PINEROLO</b>	

Figura 23 Passaggi a livello nel tratto a singolo binario

Il forte limite è proprio l'impossibilità di riuscire a modellizzare il funzionamento dei passaggi a livello, che essendo presenti in una discreta quantità, possono essere causa di ritardi dovuti alla presenza di veicoli sulla strada ferrata o di malfunzionamenti nel sistema di abbassamento delle barriere. Nella *Figura 24* è possibile notare la concentrazione dei P.L. nel tratto a singolo binario, nota di essere citato l'incrocio tra la strada ferrata passante da Nichelino e via Torino: in questo punto infatti, anche solo esaminando gli articoli dei quotidiani si nota come i ritardi siano frequenti e quasi sempre dovuti alla presenza di auto sulla linea.



*Figura 24 Cartografia della linea in evidenza i P.A.*

### 4.3 Elaborazione statistiche su tempi e ritardi

Il servizio ferroviario è rigorosamente programmato e deve rispettare i tempi pianificati, ma presenta quotidianamente variegati fenomeni aleatori che minano la puntualità degli orari programmati.

Le variabili aleatorie a cui si fa riferimento sono i ritardi e i tempi di percorrenza che possono subire variazioni per svariate motivazioni.

Le cause di ritardo possono fare riferimento a 3 macro-categorie:

- ritardi per responsabilità dell'impresa ferroviaria proprietaria del treno;
- ritardi per responsabilità del gestore dell'infrastruttura;
- ritardi per responsabilità esterne al sistema ferroviario (cause esterne), come ad esempio problemi legati all'incarozzamento o presenza di veicoli sul tratto con passaggio a livello.

I ritardi dovuti a cause esterne al sistema possono essere distinti in:

- Ritardi primari di ordine minore che stanno nell'intorno di 5 – 10 minuti; i quali non richiedono l'alterazione dell'orario e il ritardo è stabile.
- Ritardi primari di ordine maggiore che richiedono interventi di '*dispatching*' cioè di gestione operativa delle corse. Le corse non seguono l'orario programmato ed è necessario riprogrammare le corse in tempo reale oppure annullarle.
- Ritardi secondari, i quali si propagano all'interno dell'orario a causa dell'interazione tra treni.

E' importante sottolineare che le successive analisi sui tempi vengo effettuate considerando solo i ritardi primari di ordine minore, poiché ritardi che richiedono l'intervento in gestione operativa non possono essere simulati dal software utilizzato.

I ritardi prelevati dalla piattaforma PIC prima di essere utilizzati per stimare le distribuzioni che caratterizzano in servizio sono stati selezionati come segue:

- Vengono eliminati i ritardi maggiori di 13 minuti.
  - L'analisi delle frequenze dei ritardi in arrivo nelle varie stazioni ha trovato come limite inferiore n'intorno del tredicesimo minuto di ritardo.
- Vengono eliminati i ritardi maggiori di zero, cioè gli anticipi in partenza.
  - Gli anticipi in partenza sono stati riscontrati nella stazione di Airasca, i quali erano dell'ordine dei 30 secondi con una frequenza di 3 punti su un'estrazione di 520 ritardi.

- Vengono eliminati i dati appartenenti ai treni merce<sup>19</sup>.
  - Nella stazione di Candiolo arrivano/partono dei treni merce dell'azienda Ambrogio, sita nelle vicinanze; durante il transito dei treni merce la priorità di norma è data al transito dei treni per il servizio passeggeri. Di seguito gli orari programmati due volte alla settimana (Tabella 4).

Codice	Num.Arr.	Num.Par.	Cliente	Cat.	Origine	Destinazione	Ora Arr.Prev.	Ora Par.Prev.	Bin.Arr. Reale	Bin.Par. Reale
138061	38061		003-MIR-MERCI	LIS	TORINO ORB.F.A.	Candiolo	16:02	-	III	
140355		40354	003-MIR-MERCI	TEC	Candiolo	LUINO	-	20:51		III
140355		40355	003-MIR-MERCI	TEC	Candiolo	LUINO	-	19:50		III

Tabella 4 Programmazione orari treni merce - stazione di Candiolo

Per effettuare con maggiore accuratezza l'analisi si è deciso di trattare i dati suddividendoli per fascia di Punta e fascia di Morbida.

La fascia di punta corrisponde a quel lasso di tempo in cui la domanda di trasporto aumenta e va dalle ore 6:00 alle 09:00, dalle 12:30 alle 14:30 e dalle 17:30 alle 19:30.

L'aumento della domanda in quegli orari specifici dipende dalla necessità di spostarsi per motivi di studio o lavoro. Mentre la fascia di Morbida è quella durante tutte le altre ore del giorno in cui la domanda di trasporto è stabile.

<sup>19</sup> Nell'analisi effettuata, i treni merce non vengono presi in considerazione. A Candiolo il traffico merce di Ambrogio, azienda che offre servizi di trasporto intermodale, è programmato per essere effettuato durante le fasce di morbida per evitare di creare disagio al servizio passeggeri. Attualmente i treni merce che transitano sulla linea sono dell'ordine di poche paia alla settimana. Quando un treno merce provoca problemi al servizio di trasporto passeggeri nella linea esaminata si verificano ritardi dell'ordine di 20 minuti; questi ritardi chiamati ritardi primari di ordine maggiore non è possibile esaminarli perché richiedono interventi di dispatching.

### 4.3.1 Algoritmo di fitting

Per determinare una funzione che rappresenti la relazione tra due grandezze bisogna procedere con l'interpolazione. Note alcune coppie di dati (x,y) , interpretabili come punti del piano, si deve costruire una funzione (interpolatrice) che sia in grado di descrivere al meglio la relazione esistente tra l'insieme dei valori di x e quello dei valori di y.

Nel caso in esame le due coppie di valori esaminate sono state i ritardi e le frequenze con la quale esse si verificano.

Per automatizzare il processo di elaborazione del dato è stato costruito uno script Python.

Il primo step è stato quello di lettura dei file excel scaricati dalla piattaforma PIC per poi filtrare i dati come indicato dell'immagine.

```
citta_sel = 'Airasca'

percorsofile = 'C:\\Users\\lea\\Desktop\\tesi\\Prospetti di stazione\\
\\Periodo di interesse'

list_of_files = os.listdir(percorsofile)
for item in list_of_files:
    if citta_sel in item:
        |      |      mergedData = pd.read_excel(percorsofile+'\\'+item)

# FILTRI
is_REG = mergedData[5]== 'REG'
mergedData_REG = mergedData[is_REG]

mergedData_REG = mergedData_REG.astype({13: float, 10: float})

is_m13 = mergedData_REG[10] <= 13
mergedData_REG = mergedData_REG[is_m13]

is_g0 = mergedData_REG[13] >= 0
mergedData_REG = mergedData_REG[is_g0]
```

Successivamente sono stati uniformati i 'tipi' per consentire di trovare la fascia a cui apparteneva il ritardo.

```

#reindicizzo
new_index = np.linspace(0, len(mergedData_REG), len(mergedData_REG), dtype = 'int')
mergedData_REG.index = new_index

#Converto dtype da objet a datetime
ora_part_prev = pd.to_datetime(mergedData_REG[11], format= '%H:%M')
ora_arr_prev = pd.to_datetime(mergedData_REG[8], format= '%H:%M')

#Calcolo il tempo di fermata
tempo_fermata = ora_part_prev.dt.minute - ora_arr_prev.dt.minute + mergedData_REG[13]-
mergedData_REG[10]

# 06:00-09:00,12:30-14:30,17:30-19:30 = PUNTA
time1 = dt.time(6,0)
time2 = dt.time(9,0)
time3 = dt.time(12,30)
time4 = dt.time(14,30)
time5 = dt.time(17,30)
time6 = dt.time(19,30)

#Converto da datetime a time
OraPartPrev_Time = ora_part_prev.dt.time
OraArrPrev_Time = ora_arr_prev.dt.time

#distinguo morbida e punta
fascia_array = [" " for x in range(len(mergedData_REG))]

for i in range(len(mergedData_REG)):
    if(((time1 <= OraArrPrev_Time.iloc[i] <=time2)and(time1 <= OraPartPrev_Time.iloc[i] <=time2)) or\
        ((time3 <= OraArrPrev_Time.iloc[i] <=time4)and(time3 <= OraPartPrev_Time.iloc[i] <=time4)) or\
        ((time5 <= OraArrPrev_Time.iloc[i] <=time6)and(time5 <= OraPartPrev_Time.iloc[i] <=time6))):
        fascia_array[i] = 'FASCIA_DI_PUNTA'
    else:
        fascia_array[i] = 'FASCIA_DI_MORBIDA'

```

Infine, selezionando la fascia desiderata e attraverso l'uso del pacchetto 'matplotlib', è stato possibile stimare i parametri caratterizzanti la distribuzione che meglio descrive i dati in input.

```

# CALCOLO MU, SIGMA

fascia_selezionata = 'FASCIA_DI_PUNTA'
#fascia_selezionata = 'FASCIA_DI_MORBIDA'

is_fascia = mergedData_REG['FASCIA']== fascia_selezionata
mergedData_REG = mergedData_REG[is_fascia]

x = mergedData_REG["Tempo di fermata"].values

param = lognorm.fit(x, floc=0)
sigma = param[0]
shift = param[1]
mu = np.log(param[2])

print("Parametri del fit [mu,sigma,shift]: ", mu,sigma,shift)

x_fit=np.linspace(0,x.max(),100)

pdf_fitted = lognorm.pdf(x_fit, param[0], loc=param[1], scale=param[2])# fitted distribution
cdf_fitted = lognorm.cdf(x_fit, param[0], loc=param[1], scale=param[2])# fitted cumulative

num_sample = int(round(x.max()/0.5))
Nc = np.linspace(x.min(),x.max(),num_sample)
pdf, bins = np.histogram(x, Nc,range=(x.min(),x.max()), density = False)

fig, axs = plt.subplots(3,sharex='col')
fig.suptitle('%s - %sfascia_selezionata + %s'%citta_sel, fontsize=15)
#fig.align_xlabels()
axs[0].plot(x_fit,pdf_fitted,'r-')
axs[0].set_title('PDF')
axs[0].grid()

```

### 4.3.2 Ritardo in uscita dal nodo di Torino

Dal momento che la porzione del sistema ferroviario 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. Benché non venga esaminato direttamente il traffico del nodo di Torino, è possibile valutare gli effetti indiretti che esso provoca al passaggio dei treni della linea Sfm2 in direzione Pinerolo. Infatti, analizzando il ritardo in ingresso al sistema in esame e come se consideriamo gli effetti del Nodo. In particolare, il ritardo in uscita dal Nodo di Torino corrisponde al ritardo in ingresso nella stazione di Moncalieri Sangone.

Analizzando il ritardo in ingresso è necessario considerare la possibilità che esso abbia anche valori negativi, cioè bisogna considerare il materiale rotabile può entrare nel sistema in anticipo.

La variabile aleatoria che meglio caratterizza il comportamento dei dati è una distribuzione lognormale shiftata, caratterizzata da tre parametri: media, varianza e scostamento.

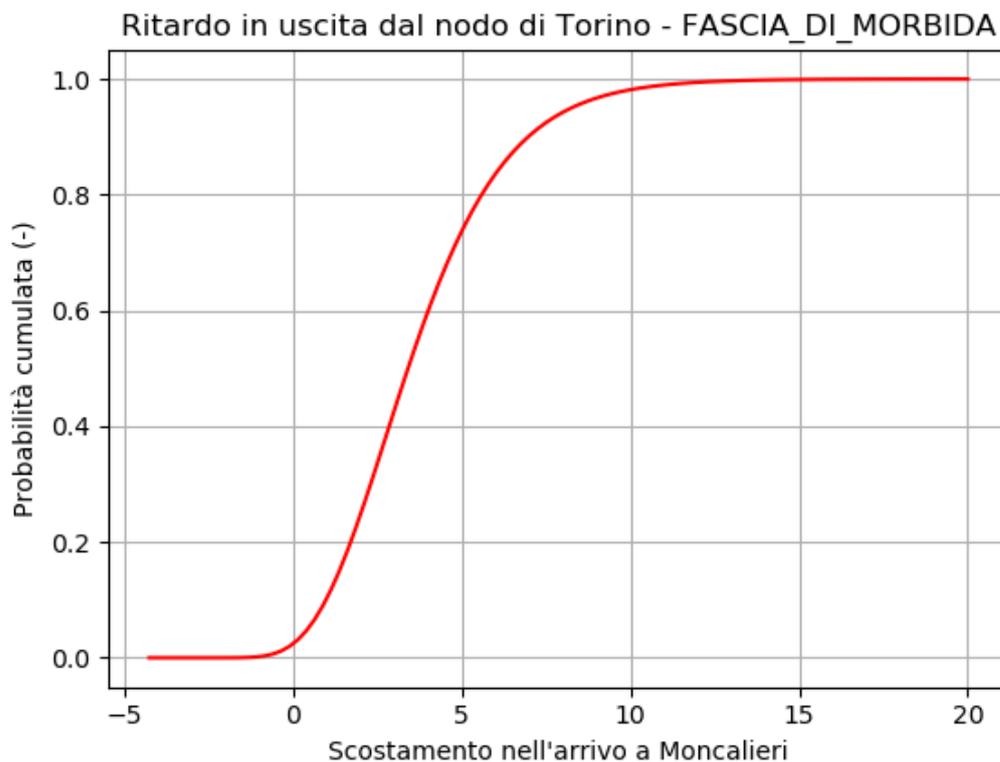


Figura 25 CDF Ritardo in uscita dal nodo (fascia di morbida)

La media che caratterizza i ritardi in uscita dal nodo di Torino, all'interno della fascia di morbida, è di 2 minuti e 2 secondi con una deviazione standard di 2 minuti e 56 secondi con uno shift di 4 minuti e 16 secondi.

La funzione di ripartizione è:

$$P(x) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cdot \operatorname{erf} \left( \frac{\ln(x + 4,2773) - 2,0379}{0,2974\sqrt{2}} \right)$$

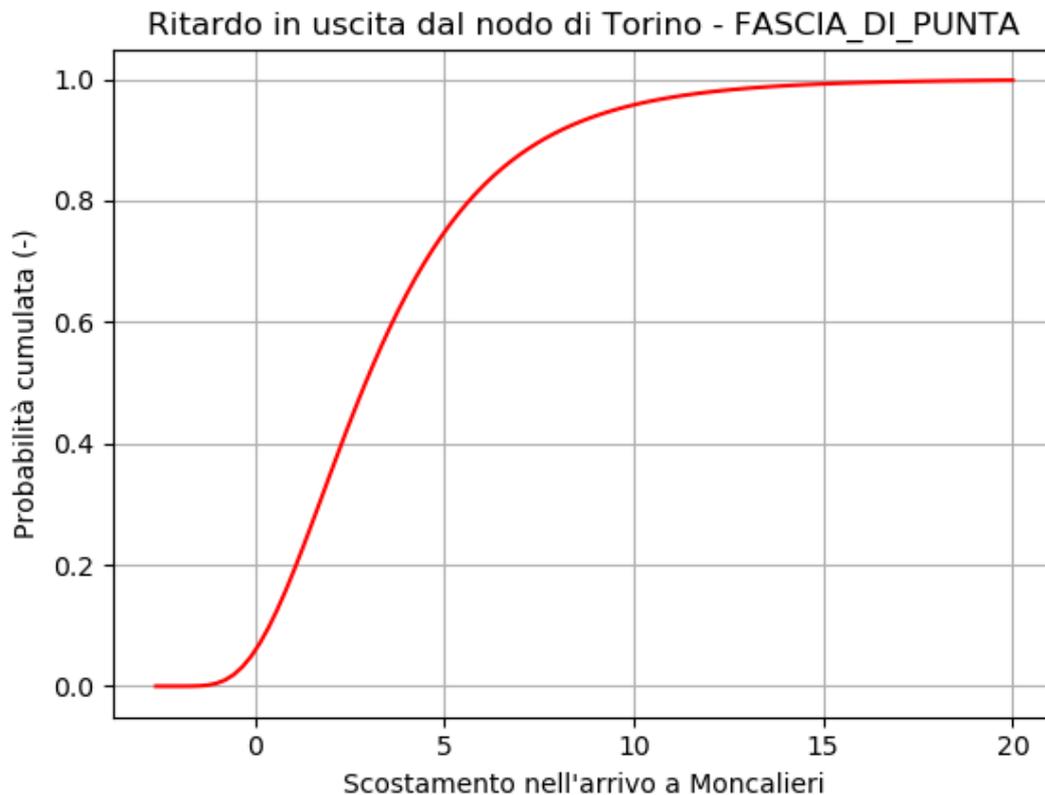


Figura 26 CDF Ritardo in uscita dal nodo (fascia di punta)

La media che caratterizza i ritardi in uscita dal nodo di Torino, all'interno della fascia di morbida, è di 1 minuto e 42 secondi con una deviazione standard di 2 minuti e 5 secondi con uno shift di 2 minuti e 37 secondi.

La funzione di ripartizione è:

$$P(x) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cdot \operatorname{erf} \left( \frac{\ln(x + 2,6152) - 1,7109}{0,4775\sqrt{2}} \right)$$

Attraverso le due CDF (*Cumulative Distribution Function*) è stato possibile calcolare le PDF (*Probability Density Function*) corrispondenti alle due fasce orarie che descrivono il ritardo in uscita dal nodo di Torino.

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

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot 0,2974 \cdot x} \cdot e^{-\frac{(\ln(x+4,2773)-2,0379)^2}{2 \cdot 0,2974^2}}$$

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

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot 0,4775 \cdot x} \cdot e^{-\frac{(\ln(x-2,6152)-1,7109)^2}{2 \cdot 0,4775^2}}$$

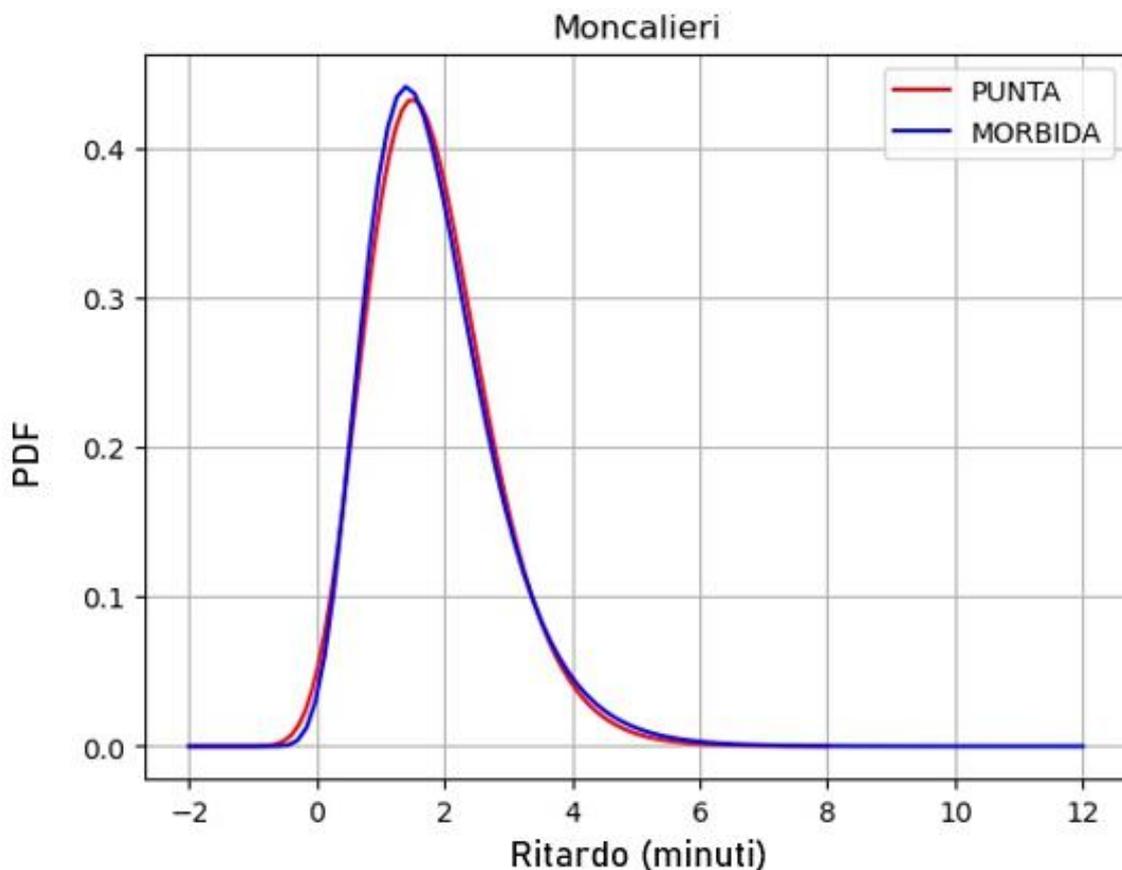


Figura 27 PDF Ritardo in uscita dal nodo

Dal grafico si evince che, pur differenziando le due fasce, non vi sono grandi variazioni sulla media del ritardo. L'elemento da non sottovalutare è  $\sigma$  (sigma), che nella fascia di punta è inferiore rispetto a quella di morbida; ciò sta a significare che nella fascia di punta la probabilità che il ritardo si discosti dalla media è inferiore rispetto alla fascia di morbida. Nella fascia di morbida riscontriamo infatti una possibilità maggiore che i treni escano dal nodo con un ritardo negativo, cioè arrivino nel sistema in anticipo.

### 4.3.3 Ritardo in partenza da Pinerolo

Il volume preso in esame termina con la stazione di testa di Pinerolo, stazione in cui ogni binario termina con un paraurti (binario di circolazione tronco) in cui tutti i binari possono essere usati per gli arrivi e le partenze.

Analizzando il ritardo in partenza, bisogna ricordare che la partenza in anticipo non è concessa e i ritardi possono andare da 0 a infinito potenzialmente, di conseguenza la distribuzione che meglio rappresenta il comportamento di questo fenomeno è un'esponenziale negativa caratterizzata dal parametro  $\lambda$  (*lambda*).

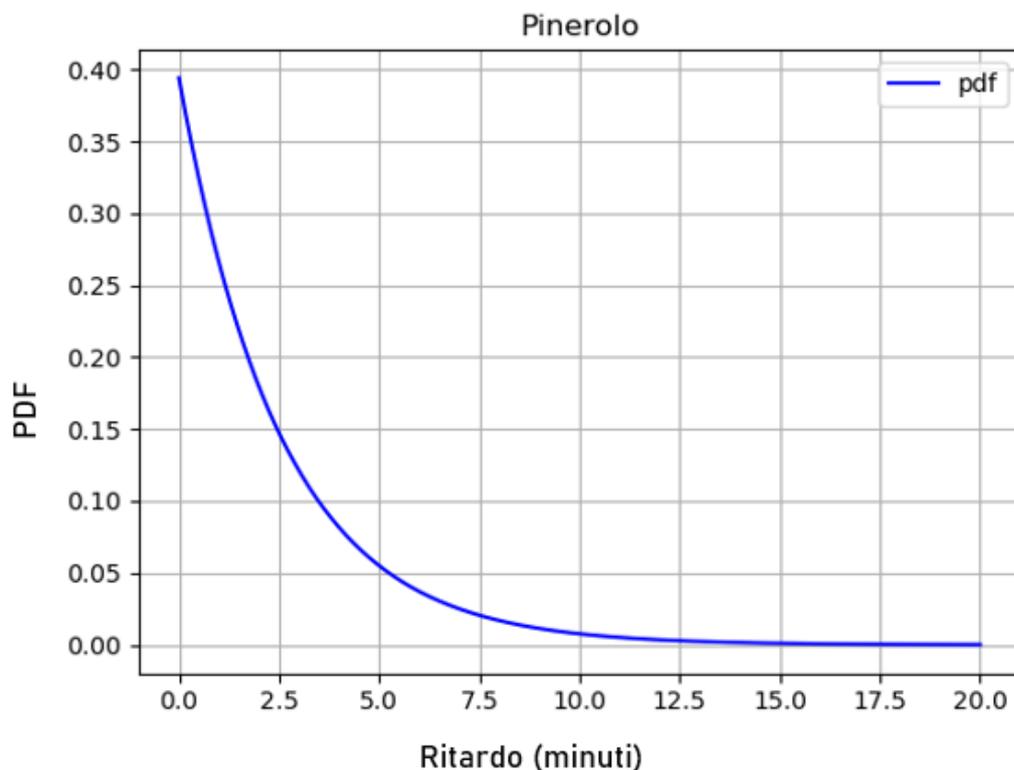


Figura 28 PDF Ritardo in partenza da Pinerolo

Si noti che in questo caso non è stata fatta differenziazione tra le fasce, questo perché il ritardo non è risultato essere correlato all'orario.

Considerando la media giornaliera il ritardo alla partenza risulta essere di 24 secondi.

L'equazione che descrive la funzione di ripartizione è:

$$P(x) = 1 - e^{-0,3940x}$$

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

$$f(x) = 0,3940 \cdot e^{-0,3940 \cdot x}$$

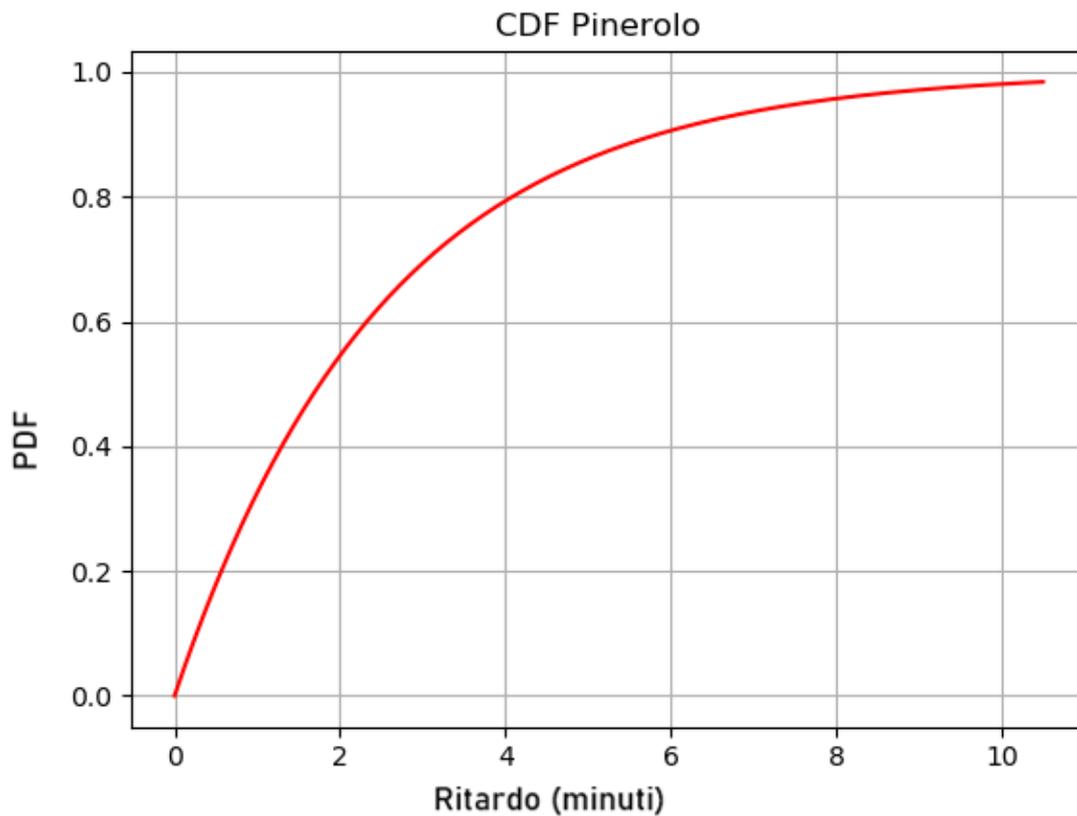


Figura 29 CFD Ritardo in partenza da Pinerolo

### 4.3.4 Statistiche sui tempi di sosta nelle località

Per poter costruire in maniera più dettagliata il modello d'esercizio che verrà simulato, oltre ad inserire i tempi in ingresso del sistema e il ritardo dalla stazione di testa, si stimano le distribuzioni sui tempi di sosta di tutte le stazioni e fermate.

Il tempo di sosta è una variabile molto importante poiché scandisce il comportamento della simulazione, cioè permette alla simulazione di essere più attendibile possibile e di rappresentare al meglio la realtà.

Prima di esplicitare le variabili stocastiche calcolate in questo paragrafo è necessario sottolineare la differenza tra stazione e fermata.

-Le *Fermate* sono particolari località di servizio pubblico per viaggiatori.

Sono poste su un binario o su due binari passanti quando la linea è a doppio binario.

Queste non intervengono nel distanziamento dei treni, i quali non vi effettuano e non possono effettuarvi incroci o precedenze. Di regola l'infrastruttura delle fermate è essenziale e spesso priva di servizi accessori. Nelle fermate avvengono solo le operazioni di movimentazione dei passeggeri.

-La *Stazione* è una località di servizio delimitata da segnali di protezione in cui avvengono le operazioni di movimento dei treni e le operazioni di gestione della circolazione (precedenze ed incroci) sia quelle di movimentazione delle merci e dei passeggeri (salita e discesa).

Il chiarimento risulta essere necessario per poter capire facilmente che l'analisi sui tempi di sosta delle fermate può essere con ragionevole certezza approssimata ad una variabile deterministica e non stocastica, confermato ex post dal calcolo.

Nel tratto di linea in esame le fermate sono indicate di seguito:

- Nichelino;
- Pinerolo Olimpica.

In virtù di quanto osservato in precedenza, si considera un tempo di sosta delle fermate pari a 60 secondi; tale tempo è necessario per effettuare le operazioni di discesa e salita dei passeggeri, ed è stato considerato deterministico.

Prendendo in esame le stazioni esplicitiamo i risultati singolarmente.

Analizzando i dati sui ritardi nella stazione di Airasca si trova che la media dei tempi di sosta per la fascia di morbida è 1 minuto e 48 secondi con deviazione standard pari a 50 secondi, mentre per la fascia di punta si ha una media di 1 minuto e 51 secondi con deviazione standard di 1 minuto e 7 secondi.

Le equazioni che descrivono le rispettive funzioni di ripartizione sono:

$$P(x) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cdot \operatorname{erf} \left( \frac{\ln(x) - 0,5850}{0,2883 \sqrt{2}} \right)$$

$$P(x) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cdot \operatorname{erf} \left( \frac{\ln(x) - 0,6934}{0,3899 \sqrt{2}} \right)$$

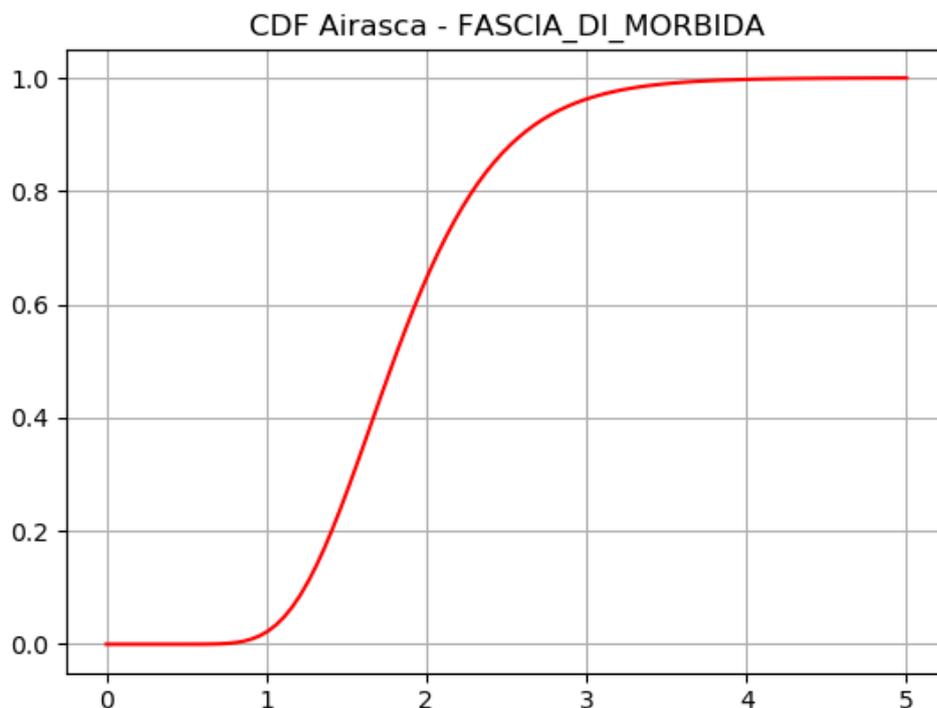


Figura 30 CDF Tempo di fermata Airasca (morbida)

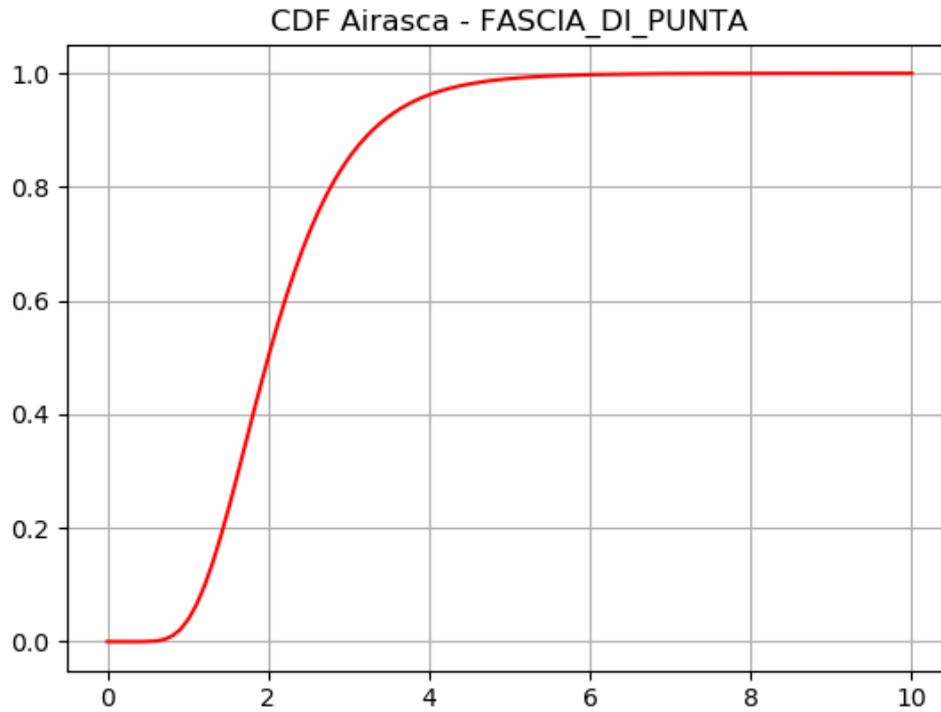


Figura 31 CDF Tempo di fermata Airasca (punta)

La PDF per la fascia di morbida risulta:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot 0,2883 \cdot x} \cdot e^{-\frac{(\ln(x)-0,5850)^2}{2 \cdot 0,2883^2}}$$

La PDF per la fascia di morbida risulta:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot 0,3899 \cdot x} \cdot e^{-\frac{(\ln(x)-0,6934)^2}{2 \cdot 0,3899^2}}$$

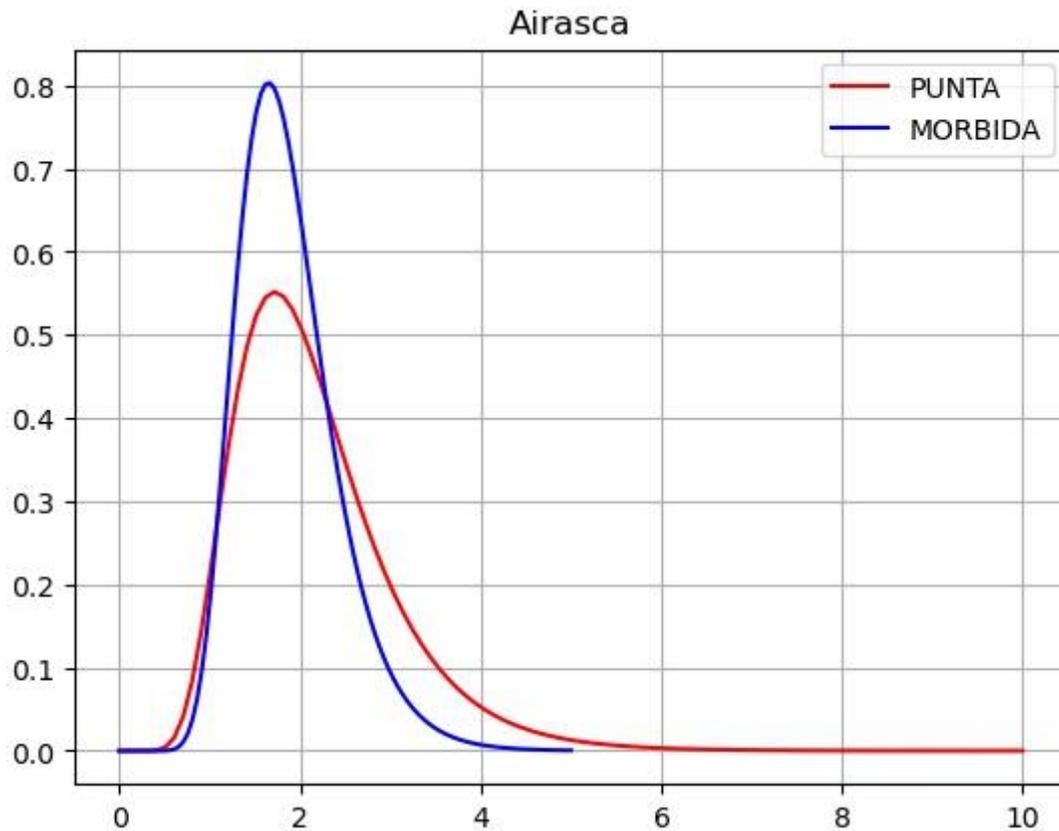


Figura 32 PDF Tempo di fermata Airasca

Per la stazione di None è stato ottenuto per la fascia di morbida una media del tempo di fermata di 2 minuti e 26 secondi con deviazione standard di 43 secondi.

Per la fascia di punta troviamo una media di 2 minuti e 28 secondi con deviazione standard di 41 secondi.

Le equazioni che descrivono le rispettive funzioni di ripartizione sono:

$$P(x) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cdot \operatorname{erf} \left( \frac{\ln(x) - 0,7711}{0,2294 \sqrt{2}} \right)$$

$$P(x) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cdot \operatorname{erf} \left( \frac{\ln(x) - 0,8010}{0,2044 \sqrt{2}} \right)$$

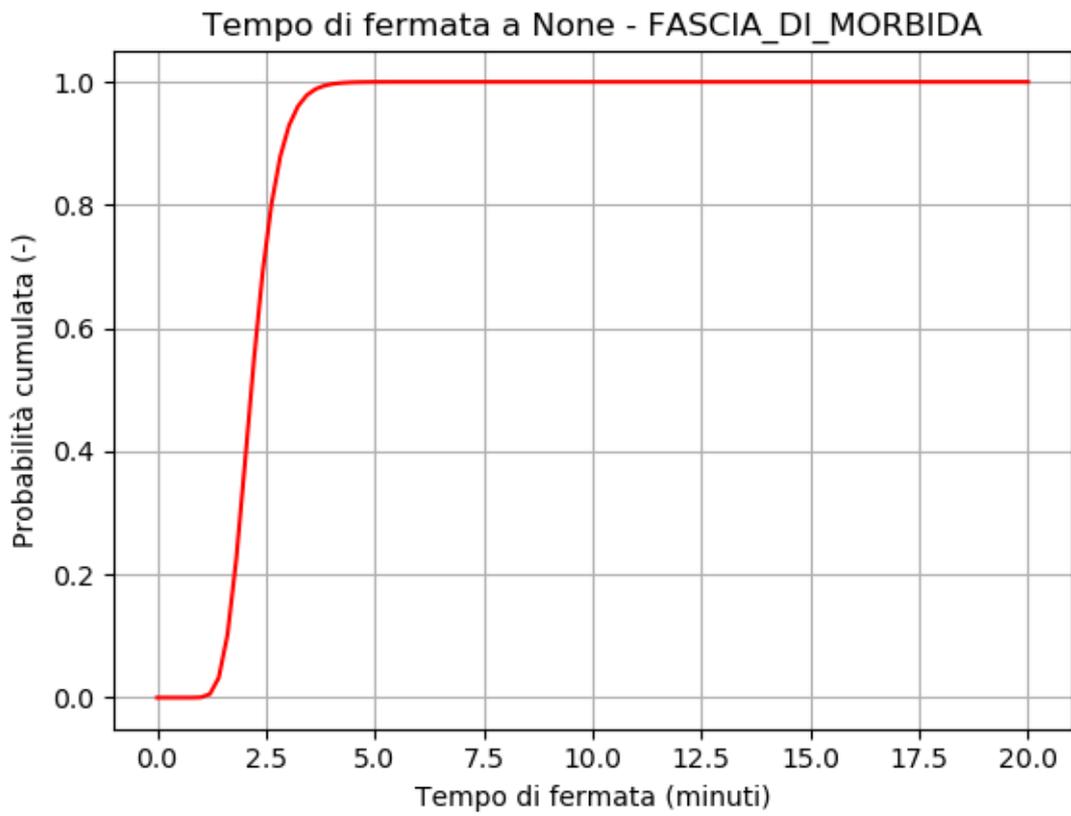


Figura 33 CDF Tempo di fermata None (morbida)

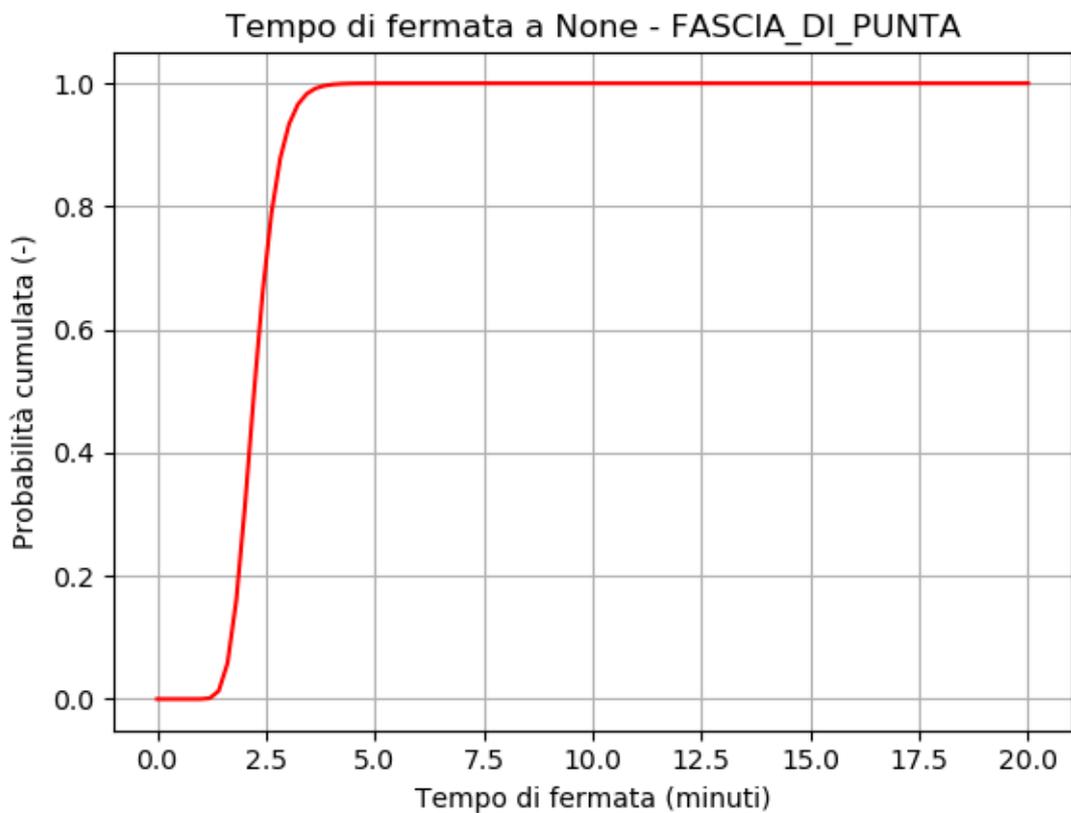


Figura 34 CDF Tempo di fermata None (punta)

La PDF per la fascia di morbida risulta:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot 0,2294 \cdot x} \cdot e^{-\frac{(\ln(x)-0,7711)^2}{2 \cdot 0,2294^2}}$$

La PDF per la fascia di punta risulta:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot 0,2044 \cdot x} \cdot e^{-\frac{(\ln(x)-0,8010)^2}{2 \cdot 0,2044^2}}$$

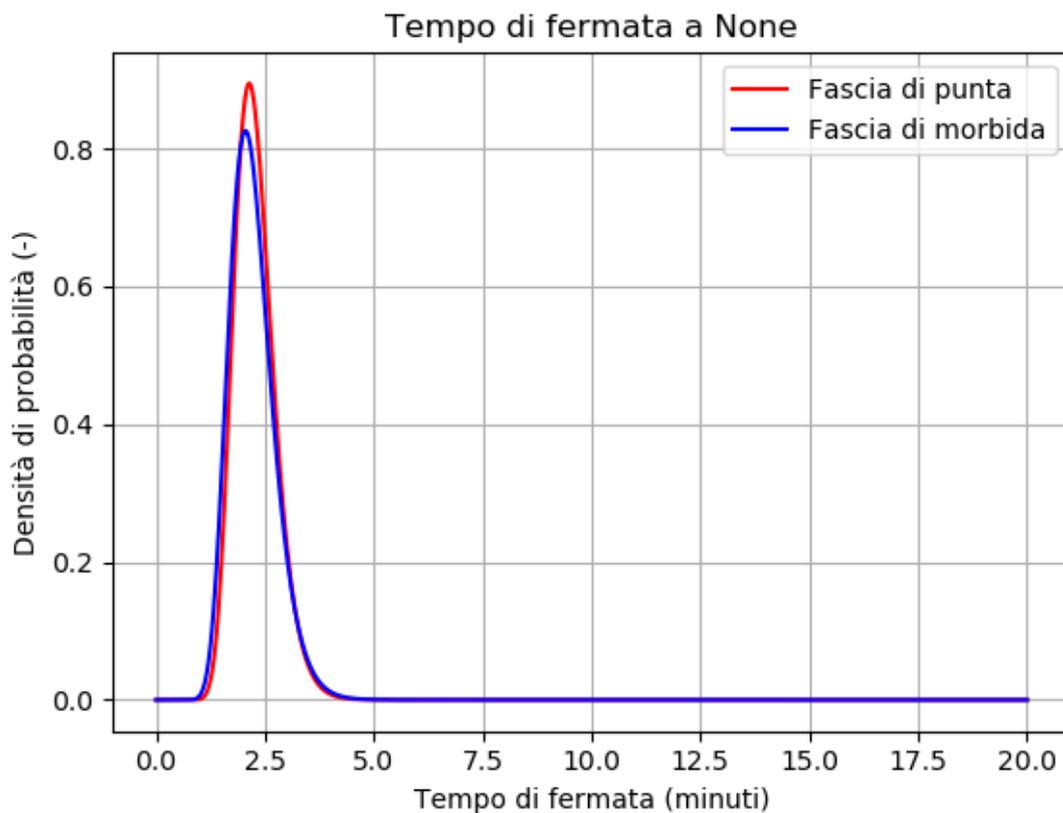


Figura 35 PDF Tempo di fermata None

Esaminando la stazione di Piscina di Pinerolo e ricordando che funge da stazione in cui effettuare l'incrocio dei treni provenienti dalla due direzioni opposte, non è possibile stimare in maniera adeguata il tempo di sosta, dal momento che esso è fortemente correlato al tempo necessario per effettuare le operazioni di deviato, ovvero le operazioni che permettono ad un treno di passare da un binario all'altro.

Prendendo in esame la stazione di Candiolo sono state calcolate la media e deviazione standard del tempo di sosta solo per la fascia di morbida, per la fascia di punta vale lo stesso concetto espresso per la stazione di Piscina di Pinerolo, infatti, la stazione funge da incrocio nella fascia di punta.

Nella fascia d morbida risulta che la media del tempo di sosta è di 2 minuti e 20 secondi con deviazione standard di 40 secondi.

La funzione di ripartizione che descrive il fenomeno è:

$$P(x) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cdot \operatorname{erf} \left( \frac{\ln(x) - 0,7725}{0,3306 \sqrt{2}} \right)$$

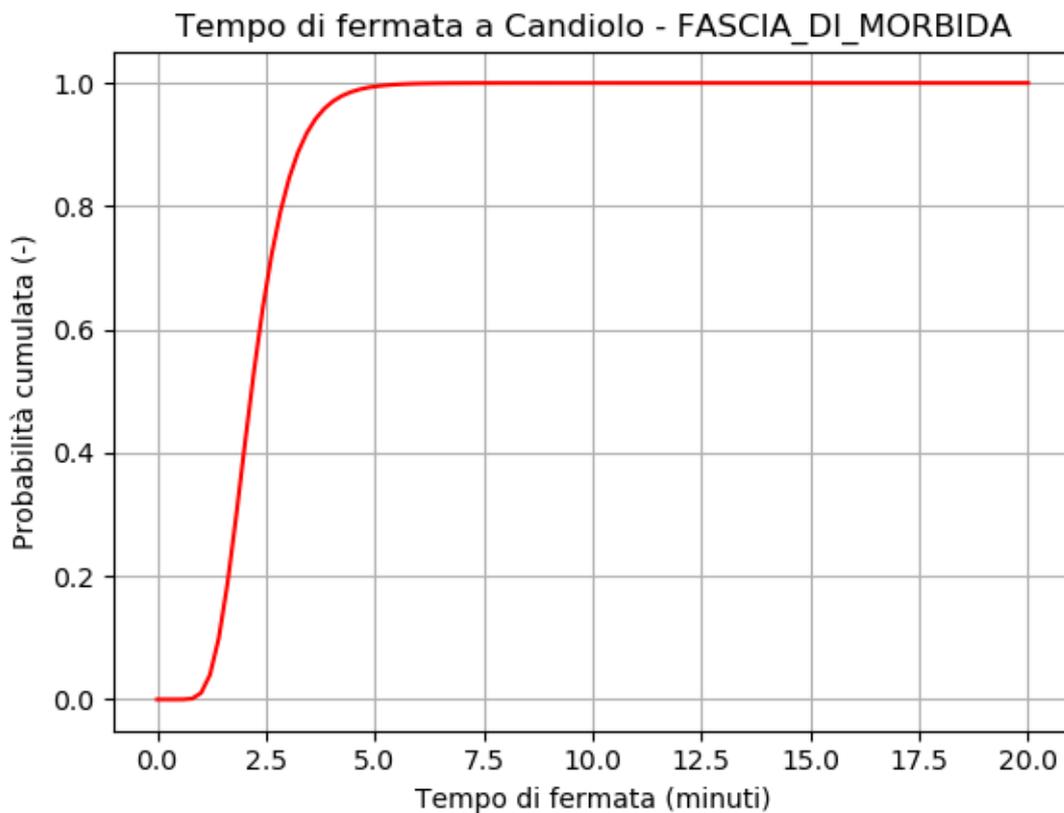


Figura 36 CDF Tempo di fermata Candiolo (morbida)

La funzione di densità di probabilità è:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot 0,3306 \cdot x} \cdot e^{-\frac{(\ln(x)-0,7725)^2}{2 \cdot 0,3306^2}}$$

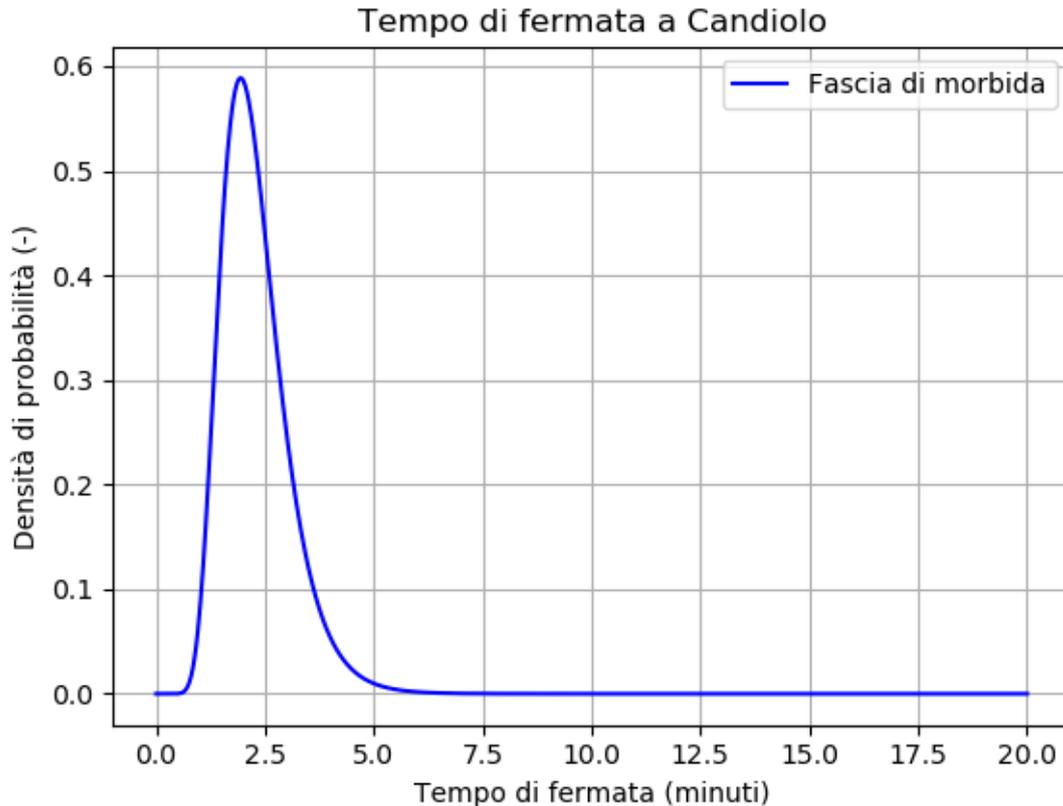


Figura 37 PDF Tempo di fermata Candiolo

Analizzando i dati sui ritardi nella stazione di Moncalieri Sangone si trova che la media dei tempi di sosta per la fascia di morbida è 1 minuto e 28 secondi con deviazione standard pari a 38 secondi, mentre per la fascia di punta si ha una media di 1 minuto e 35 secondi con deviazione standard di 42 secondi.

Le equazioni che descrivono le rispettive funzioni di ripartizione sono:

$$P(x) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cdot \operatorname{erf}\left(\frac{\ln(x) - 0,4624}{0,5964 \sqrt{2}}\right)$$

$$P(x) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cdot \operatorname{erf} \left( \frac{\ln(x) - 0,5005}{0,5480 \sqrt{2}} \right)$$

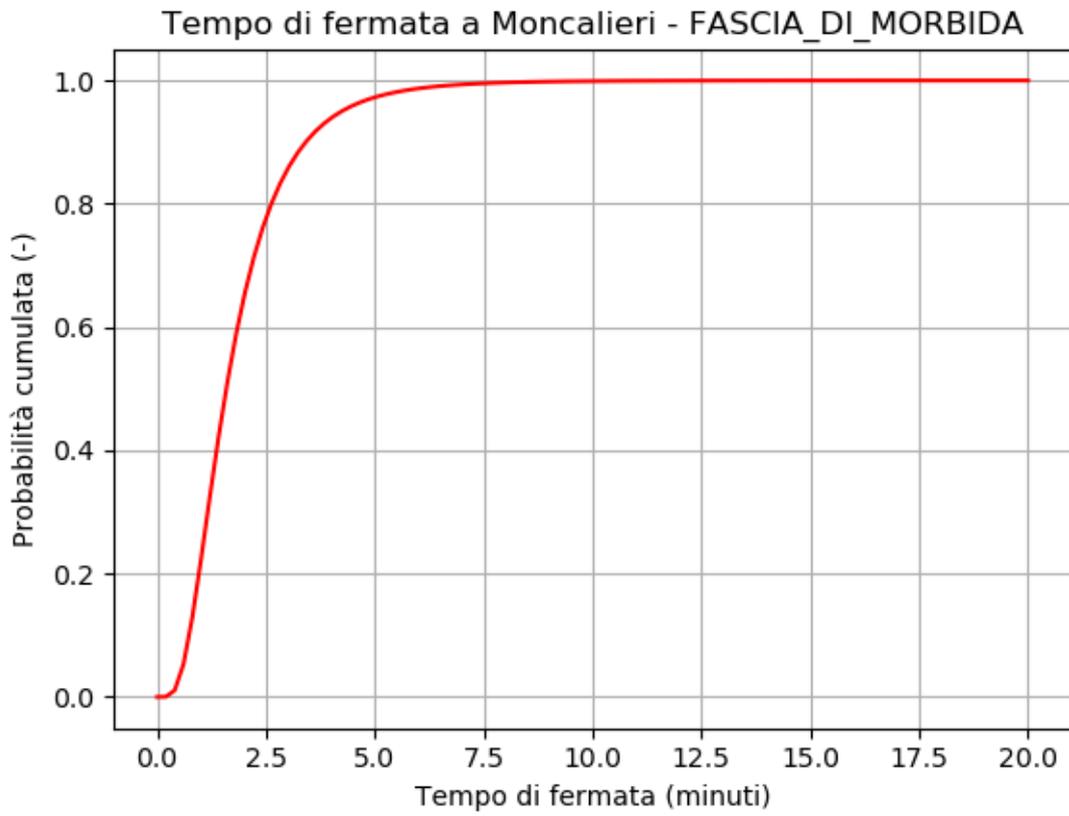


Figura 38 CDF Tempo di fermata Moncalieri (morbida)

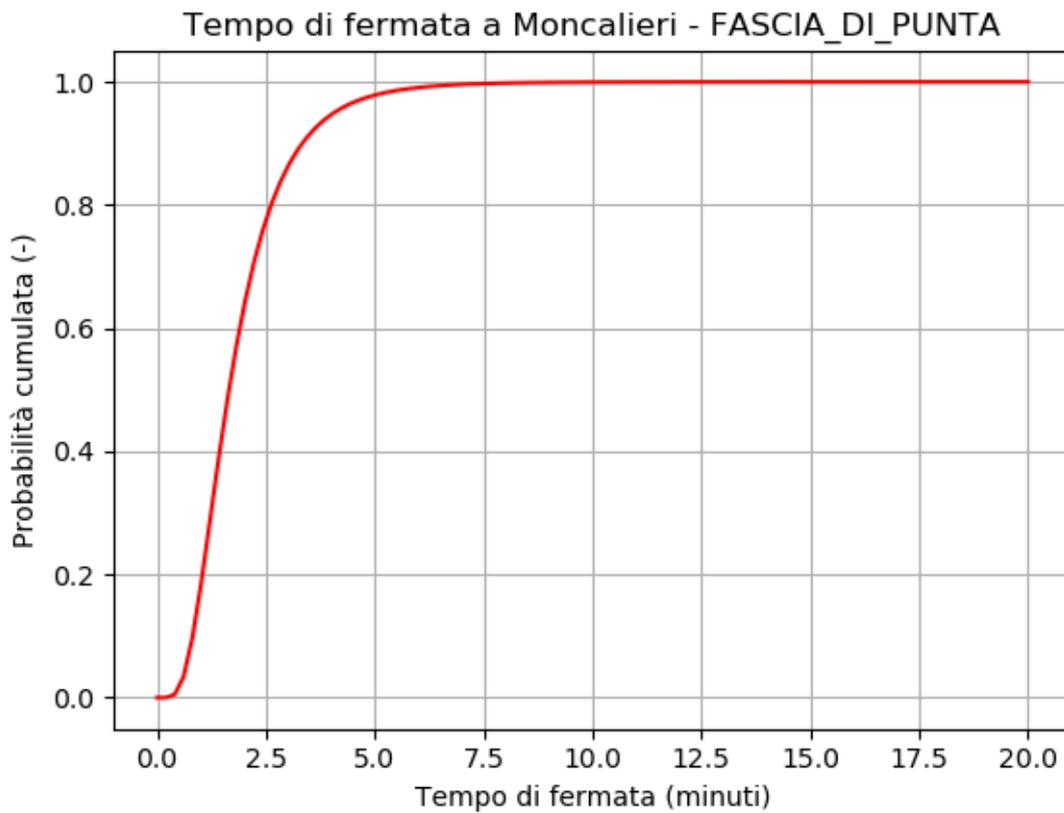


Figura 39 CDF Tempo di fermata Moncalieri (punta)

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

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot 0,5964 \cdot x} \cdot e^{-\frac{(\ln(x)-0,4624)^2}{2 \cdot 0,5964^2}}$$

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

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot 0,5480 \cdot x} \cdot e^{-\frac{(\ln(x)-0,5005)^2}{2 \cdot 0,5480^2}}$$

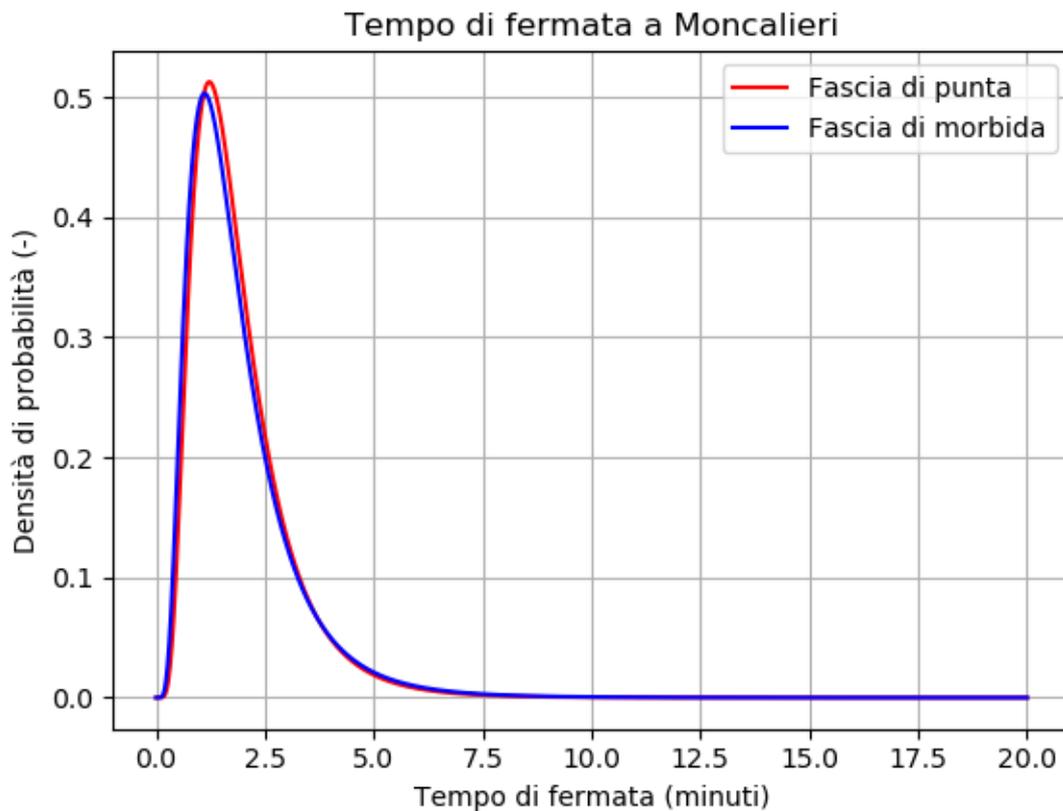


Figura 40 PDF Tempo di fermata Moncalieri

#### 4.3.4 Tempi minimi di percorrenza

La *Percorrenza* è il tempo nominale di marcia di un treno, fra due stazioni non necessariamente limitrofe, in base a cui si imposta l'orario di servizio. Per poter verificare se la traccia oraria lanciata sul sistema di simulazione SASTRE, la quale porterà a costruire la griglia di cadenzamento del servizio orario da studiare, sia coerente con i tempi di percorrenza del tracciato reale risulta imprescindibile farne un confronto.

I tempi di percorrenza minimi realmente effettuati del macchinista che esegue il tracciato della linea in esame, vengono calcolati cronometrando delle corse.

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. Confrontando il valore simulato con quello minimo praticamente ottenibile, si nota che gli

orari della simulazione sono sempre inferiori a quelli della prestazione reale del treno.

Infatti, il software simula il comportamento di un macchinista che ferma esattamente all'ultimo momento utile per consentire la riduzione esatta di velocità entro quel determinato spazio.

Con la simulazione si conosce esattamente il punto utile per consentire al treno la frenatura nel minor tempo possibile, questo profilo di marcia ottimale risulta impossibile da replicare nella realtà neanche affidandosi ai macchinisti più esperti di una linea.

Sono riportati nelle tabelle seguenti i tempi di percorrenza da traccia orario commerciale (offerta a ottobre 2019), 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. Nel caso di partenza da Pinerolo il tempo di percorrenza simulato è maggiore a causa delle fasi di accelerazione necessarie.

Tratta	Tipo di percorrenza	Tempo di percorrenza (mm:ss)		
		Da traccia orario commerciale	Minimo sperimentale	Simulato su SASTRE
Pinerolo → → Pinerolo Olimpica	Sosta - Sosta	02:00	03:00	02:30
Pinerolo Olimpica → → Piscina di Pinerolo	Sosta - Sosta	08:00	05:00	04:20
Piscina di Pinerolo → → Airasca	Sosta - Sosta	04:00	04:30	03:33
Airasca → → None	Sosta - Sosta	03:00	03:00	02:56
None → → Candiolo	Sosta - Sosta	03:00	03:00	02:40
Candiolo → → Nichelino	Sosta - Sosta	05:00	03:00	03:00
Nichelino → → Moncalieri Sangone	Sosta - Sosta	03:00	03:00	02:30

Tratta	Tipo di percorrenza	Tempo di percorrenza (mm:ss)		
		Da traccia orario commerciale	Minimo sperimentale	Simulato su SASTRE
Moncalieri Sangone → → Nichelino	Sosta - Sosta	02:00	02:00	01:45
Nichelino → → Candiolo	Sosta - Sosta	04:00	04:00	03:12
Candiolo → → None	Sosta - Sosta	05:00	03:30	03:03
None → → Airasca	Sosta - Sosta	03:00	03:00	02:43
Airasca → → Piscina di Pinerolo	Sosta - Sosta	04:00	03:00	02:09
Piscina di Pinerolo → → Pinerolo Olimpica	Sosta - Sosta	08:00	06:30	05:30
Pinerolo Olimpica → → Pinerolo	Sosta - Sosta	03:00	01:30	01:20

I minuti che mostrano il tempo di percorrenza di ciascuna coppia di stazioni non hanno tutti la stessa sensibilità. Infatti, il rapporto tra il cambiamento dell'indicazione e il corrispondente cambiamento del valore è di 1 minuto per la traccia orario commerciale, di 30 secondi per quella sperimentale e 1 secondo per quella simulata.

## Capitolo 5: Offerta di trasporto

Fin qui sono stati presentati le ipotesi di raddoppio possibili per migliorare l'offerta in termini di aumento della capacità e di potenziamento della stabilità.

L'altra finalità del presente studio è quella di presentare un nuovo modello d'esercizio che aumenti l'offerta ai passeggeri, quindi un modello con maggiori tracce orarie e più frequenti.

Tutte le tracce orarie che hanno permesso la costruzione delle griglie di cadenzamento sono state testate per rilevare assenza di conflitti fra le tracce e corretta pianificazione delle coincidenze.

Di seguito verranno esplicitati i tre modelli di esercizio, partendo da quello attualmente in uso sulla linea, passando per quello proposto dall'offerta di Trenitalia per la gestione del Servizio Ferroviario Metropolitano, per arrivare a quello elaborato dallo studio.

### 5.1 Modello di esercizio A

Come anticipato nel *paragrafo 2.3*, il modello di esercizio attualmente in fruizione che verrà indicato come **Modello di esercizio A**, è composto da 22 coppie di treni.

Tutti i treni, in entrambe le direzioni, tra Torino e Pinerolo, effettueranno le seguenti fermate (*Figura 39*):

- Moncalieri Sangone;
- Nichelino;
- Candiolo;
- None;
- Airasca;
- Piscina di Pinerolo
- Pinerolo Olimpica
- Pinerolo

L'esercizio è caratterizzato da un cadenzamento orario con rinforzo semi orario nelle fasce di punta; mentre durante i feriali il cadenzamento è biorario.



Figura 41 Fermate modello A

Per ciò che concerne il cadenzamento orario a Pinerolo, i treni partono ogni ora al minuto 17, mentre le tracce di rinforzo nelle ore di punta partono al minuto 46. Considerando la stazione di Moncalieri Sangone il cadenzamento orario è al minuto 05 e il rinforzo è al minuto 30.

Nelle fasce di morbida è previsto un solo incrocio a Piscina di Pinerolo, fanno eccezione la prima e l'ultima corsa giornaliera che non effettuano incrocio; mentre per la fascia di punta sono previsti due incroci, uno a Piscina di Pinerolo e uno a Candiolo.

Vengono utilizzati gli elettrotreni ETR.425, meglio conosciuti come "Jazz" a 5 elementi con 305 posti a sedere, per una capacità massima totale di circa 465 viaggiatori, e gli elettrotreni TAF (Treno ad Alta Frequentazione) con capacità massima di circa 540 viaggiatori. I treni Jazz vengono usati per le corse di rinforzo.

## 5.2 Modello di esercizio B

Il modello di esercizio che sarà indicato come **Modello di esercizio B** è quello proposto da Trenitalia nell'offerta per la gestione del servizio ferroviario metropolitano.

Il modello di esercizio è stato pensato per introdurre significative innovazioni all'offerta in modo tale da rappresentare un nuovo *shock* endogeno di stimolo alla domanda.

Rispetto al **modello di esercizio A**, con missione lenta (treni che effettuano tutte le fermate), viene modificata con la proposta di attivazione di un servizio a frequenza oraria con missione veloce.

Il **modello di esercizio B** (Base) viene realizzato modificando la struttura dell'orario, costruendo un cadenzamento orario con treni che fanno tutte le fermate e un cadenzamento di rinforzo di treni diretti nelle ore di punta (*Figura39*).



Figura 42 Fermate modello B

In questo modello di esercizio la missione lenta è caratterizzata dalla fermata in tutte le stazioni in entrambe le direzioni, come il modello di esercizio A; mentre la missione lenta consiste, considerando il tratto preso in esame, nella sola fermata a None in entrambe le direzioni. Per un totale di 58 treni al giorno, di cui 24 con missione veloce.

Da Pinerolo i treni con missione lenta partono ogni ora al minuto 49, mentre le tracce di rinforzo con missione veloce nelle ore di punta partono al minuto 33. Considerando la stazione di Moncalieri Sangone nel cadenzamento orario le tracce partono al minuto 33 e

quelle di rinforzo al minuto 05, anche se transitano solamente.

Con questo modello vengono eliminati i due incroci nelle fasce di punta, rispetto al modello A, e viene effettuato un solo incrocio per tutte le fasce nella stazione di None che permette incroci in contemporanea.

Vengono utilizzati gli elettrotreni ETR.425, meglio conosciuti come “Jazz” a 5 elementi, fornendo 308 posti a sedere, per una capacità massima totale di circa 465 viaggiatori e gli elettrotreni ETR 621, chiamato “Rock” con configurazione lunga (5 casse) con 600 sedute, per una capacità massima di circa 760 viaggiatori.

### 5.3 Modello di esercizio C

Nel **modello di esercizio C** viene esasperata la stabilità della linea, costruendo un servizio orario cadenzato ogni 30 minuti in tutte le stazioni (*Figura 41*) e in qualsiasi fascia e per entrambe le direzioni di marcia.

Come il **modello di esercizio A** tutti i treni effettuano le fermate in ogni stazione.



*Figura 43 Fermate modello C*

Questo modello prevede l'incrocio a None con 33 treni per senso di marcia.

Gli elettrotreni utilizzati sono i Jazz e Rock, i quali rispecchiano le caratteristiche esplicitate nel **modello di esercizio B**.

La costruzione del modello di esercizio C è stata possibile partendo da un'accurata analisi dei tempi minimi di percorrenza tra una stazione e la successiva; tale analisi ha permesso la realizzazione di una traccia orario, la quale dopo essere stata calibrata ed aver verificato l'assenza di conflitti, ha reso possibile la costruzione della griglia di cadenzamento.

Stazioni	Schedule Arrival (hh:mm)	Schedule Departure (hh:mm)	Schedule Arrival (hh:mm)	Schedule Departure (hh:mm)
Pinerolo	-	06:11	-	06:41
Pinerolo Olimpica	06:13	06:12	06:43	06:44
Piscina di Pinerolo	06:19	06:20	06:59	06:50
Airasca	06:23	06:24	06:53	06:54
None	06:27	06:28	06:57	06:58
Candiolo	06:31	06:32	07:01	07:02
Nichelino	06:35	06:36	07:05	07:06
Moncalieri sangone	06:39	06:40	07:09	07:10

Stazioni	Schedule Arrival (hh:mm)	Schedule Departure (hh:mm)	Schedule Arrival (hh:mm)	Schedule Departure (hh:mm)
Moncalieri sangone	06:16	06:17	06:46	06:47
Nichelino	06:19	06:20	06:49	06:50
Candiolo	06:23	06:24	06:53	06:54
None	06:28	06:29	06:58	06:59
Airasca	06:32	06:33	07:02	07:03
Piscina di Pinerolo	06:35	06:36	07:05	07:06
Pinerolo Olimpica	06:42	06:43	07:12	07:13
Pinerolo	06:45	-	07:15	-

Figura 44 Griglia orario modello C

La traccia orario ipotizzata non tiene conto dei possibili slot temporali che permettano l'uscita e l'entrata dei treni dal nodo senza nessun conflitto.

## Capitolo 6: Scenari Simulati

Avendo esaminato le caratteristiche dei modelli di esercizio nel *Capitolo 5* e le possibili modifiche infrastrutturali nel *Paragrafo 4.2*, nel seguente capitolo verranno descritti gli scenari simulati. Ogni scenario è frutto della combinazione di un modello di esercizio e una tipologia di raddoppio infrastrutturale.

Per poter avere un termine di paragone, il primo scenario simulato è quello “*as-is*” con l’infrastruttura attualmente esistente e il modello di esercizio A. La simulazione “*as-is*” viene nominata **Simulazione 0**. La seconda simulazione, chiamata **Simulazione 1**, prevede il raddoppio infrastrutturale nel tratto da Moncalieri Sangone fino a Candiolo con lo svolgimento del modello di esercizio A. La terza simulazione, indicata come **Simulazione 2**, include il raddoppio infrastrutturale tra Pinerolo e Piscina di Pinerolo in presenza del modello di esercizio A. La quarta simulazione è caratterizzata dall’infrastruttura attualmente in essere con il modello di esercizio B, la quale verrà indicata come **Simulazione 3**. La quinta simulazione, chiamata **Simulazione 4**, prevede il raddoppio infrastrutturale nel primo tratto, tra Moncalieri Sangone e Candiolo, e il modello di esercizio è quello B. La sesta simulazione, indicata come **Simulazione 5**, prende in considerazione il modello di esercizio B insieme al raddoppio dell’ultimo tratto della linea, quello da Pinerolo a Piscina di Pinerolo. L’ultimo scenario simulato prevede l’utilizzo del modello di esercizio C; come anticipato nel precedente capitolo il cadenzamento del modello C è uno scenario limite. L’infrastruttura attuale non permette l’inserimento di un cadenzamento semi-orario ed esaminando i due raddoppi viene escluso il raddoppio tra Moncalieri Sangone e Candiolo, perché non si avrebbero sufficienti margini per l’ingresso e l’uscita da Pinerolo. Quindi, l’ultimo scenario simulato, chiamato **Simulazione 6**, include il modello di esercizio C con il raddoppio infrastrutturale tra Pinerolo e Piscina di Pinerolo.

## 6.1: Simulazione 0



Figura 45 Infrastruttura Simulazione 0

L'orario grafico è un diagramma cartesiano con i tempi sulle ascisse (in altro le ore) e la posizione nelle ordinate (le stazioni); attraverso questa tipologia di orario vengono messe in evidenza le corse.

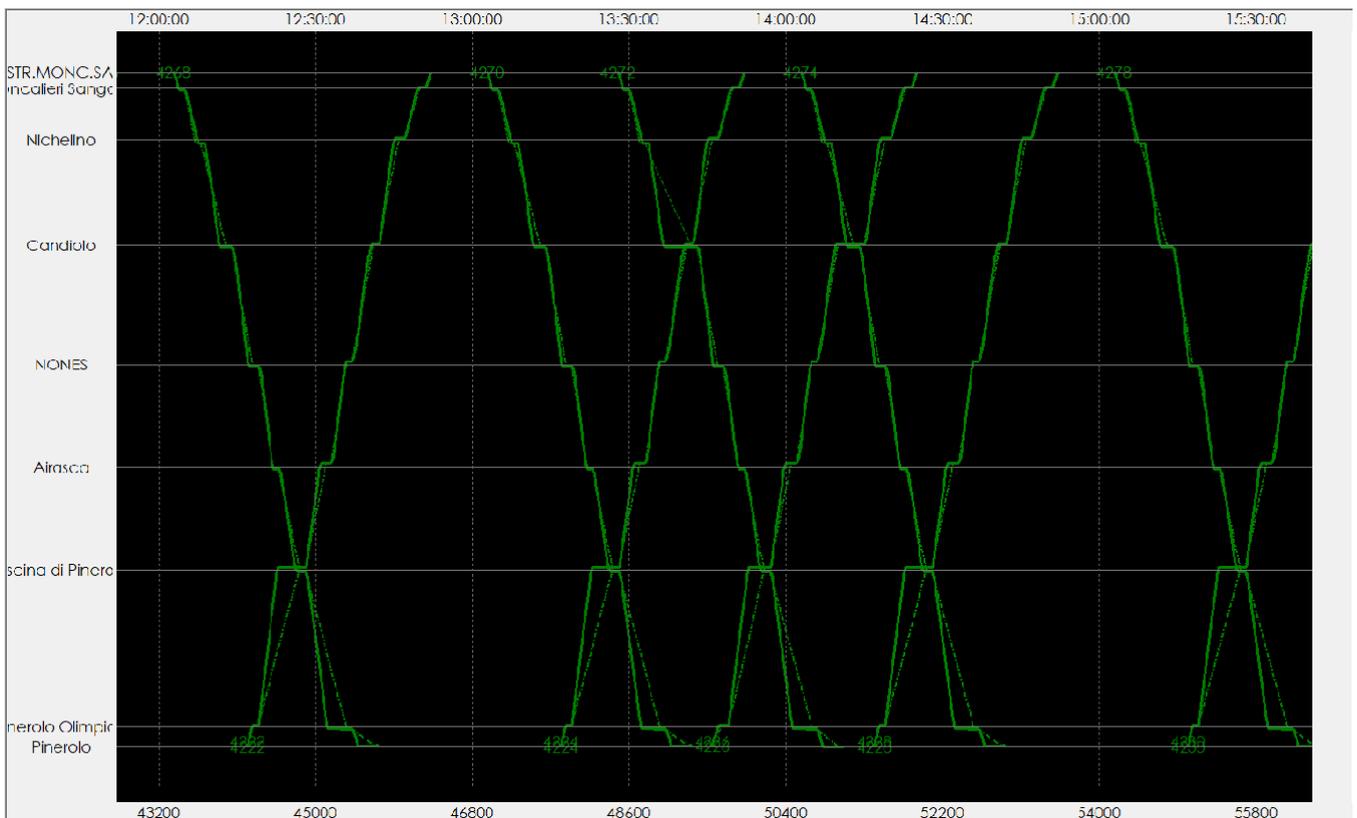


Figura 46 Orario Grafico Simulazione 0

Il tempo di percorrenza programmato per l'intera tratta è di 28 minuti; mentre quello simulato è di 25 minuti.

## 6.2: Simulazione 1

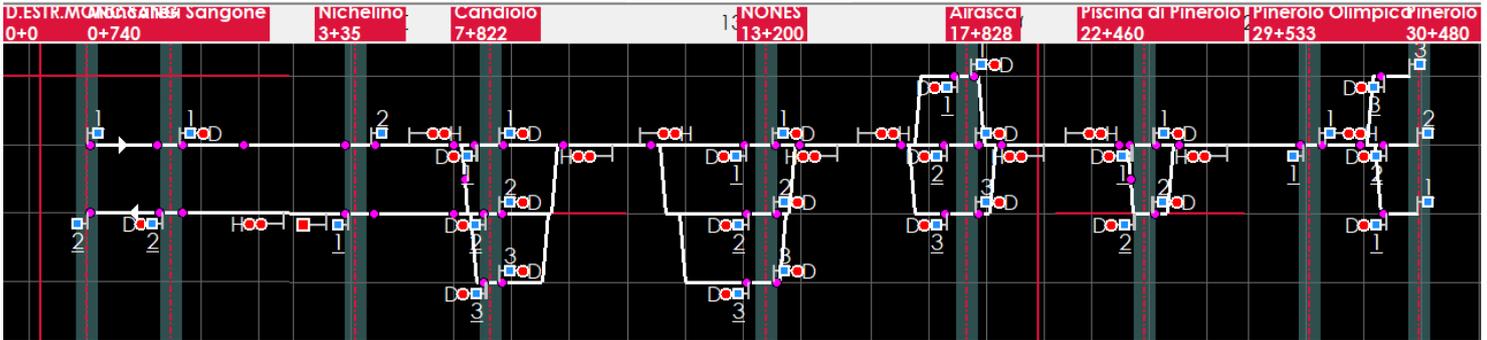


Figura 47 Infrastruttura simulazione 1

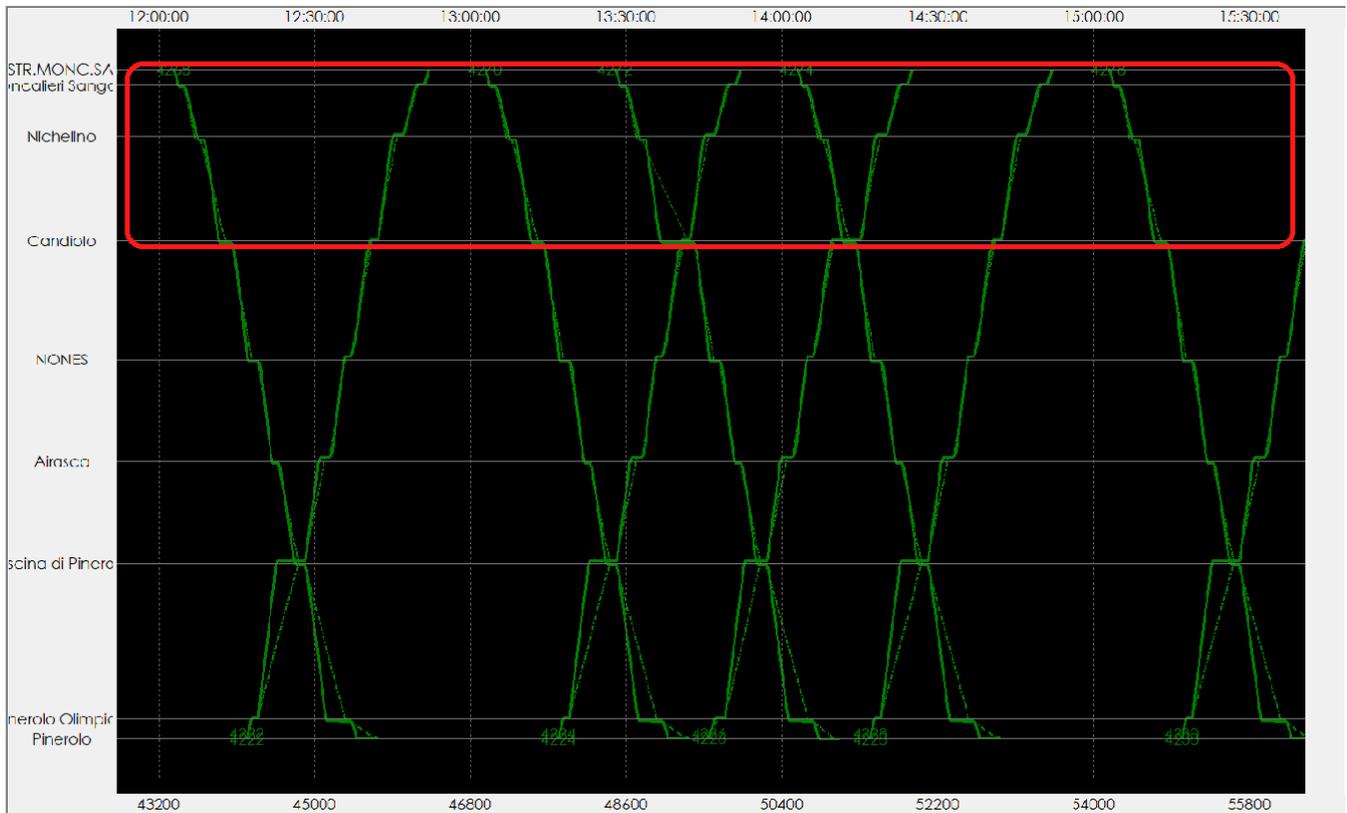


Figura 48 Orario grafico simulazione 1

Nello schema infrastrutturale è immediato notare il raddoppio, mentre per l'orario grafico il raddoppio è stato messo in evidenza contrassegnando la parte in rosso.

Il tempo di percorrenza programmato per l'intera tratta è di 28 minuti; mentre quello simulato è di 24 minuti 14 secondi.

### 6.3: Simulazione 2

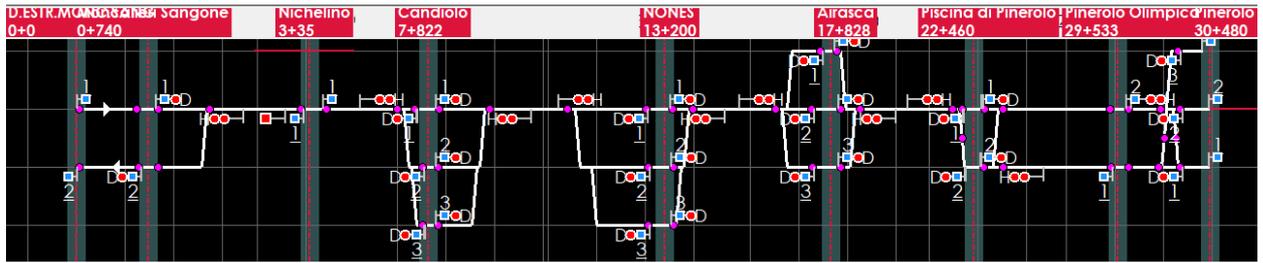
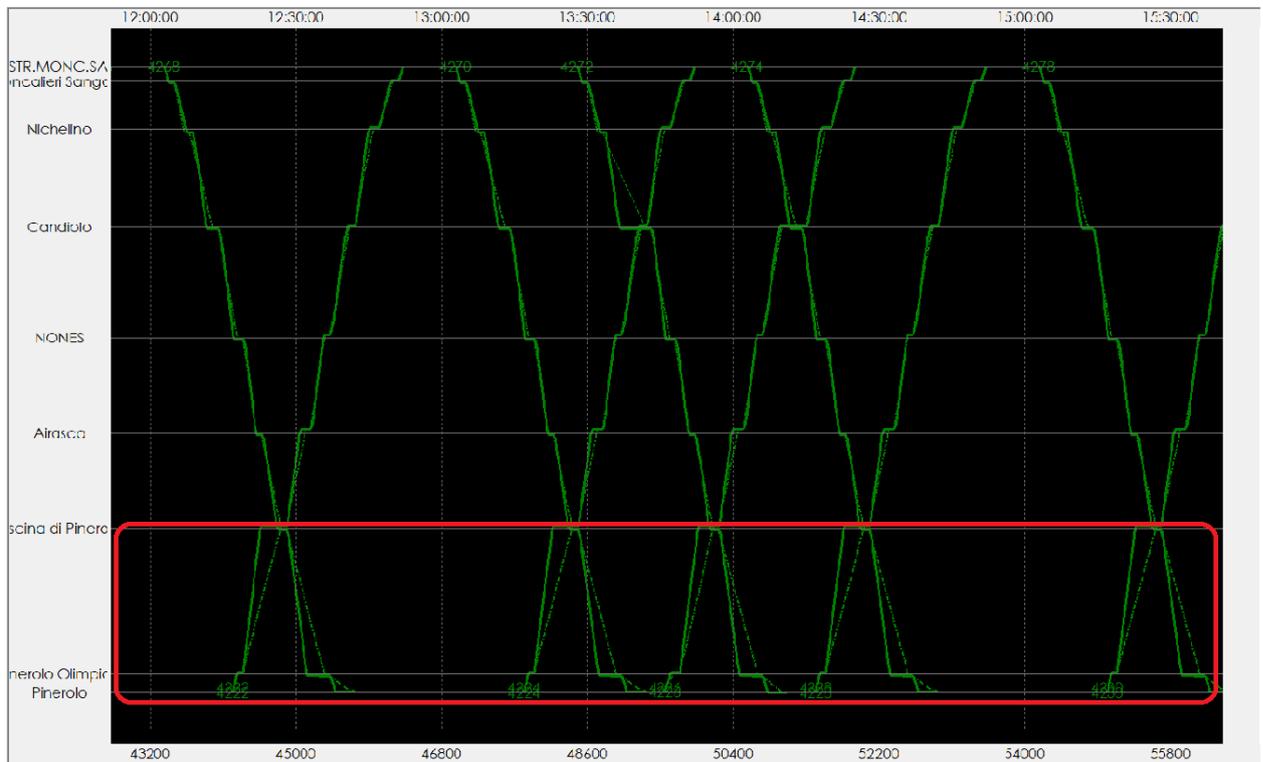


Figura 49 Infrastruttura simulazione 2



Come nel *paragrafo 6.2* nell'orario grafico è stato messo in evidenza il tratto di strada ferrata raddoppiata.

Il tempo di percorrenza programmato per l'intera tratta è di 28 minuti; mentre quello simulato è di 23 minuti 30 secondi.

## 6.4: Simulazione 3

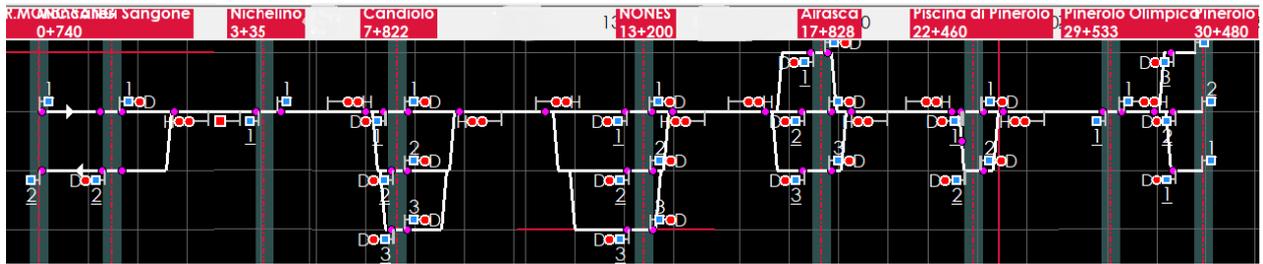


Figura 50 Infrastruttura simulazione 3

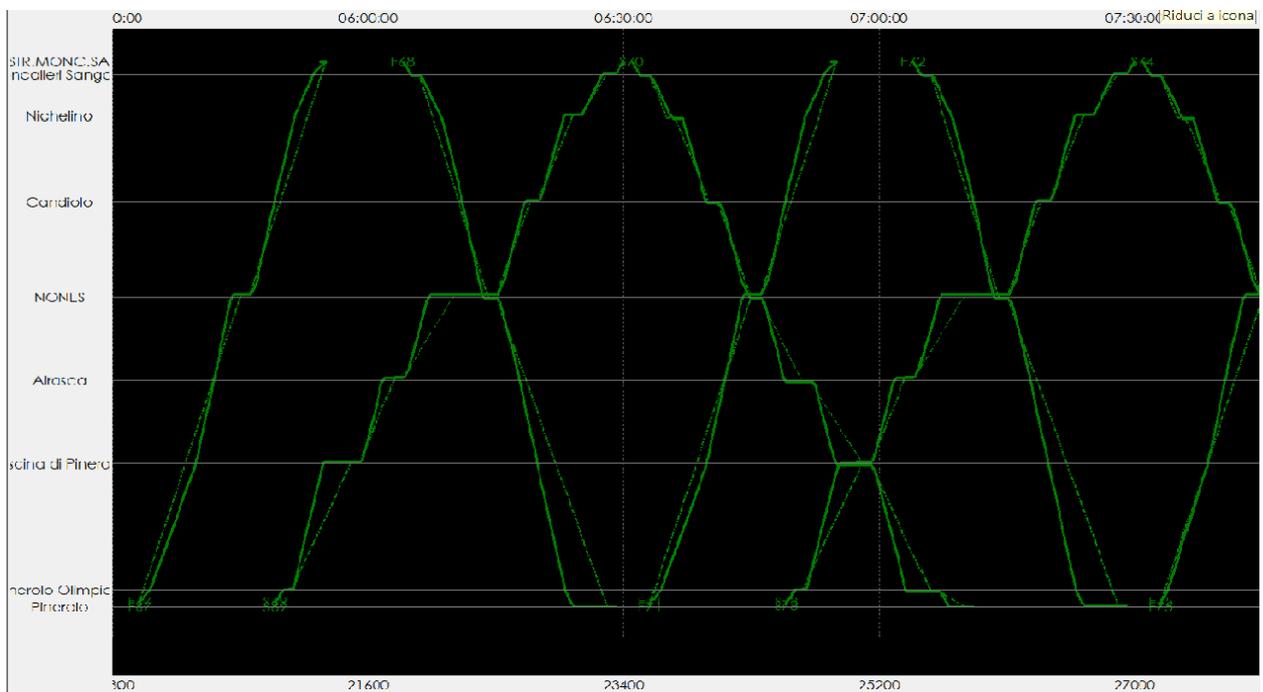


Figura 51 Orario grafico simulazione 3

In questo scenario il tempo di percorrenza programmato per i treni con missione veloce è di 23 minuti, mentre quello simulato è di 22 minuti. Per i treni con missione lenta il tempo di percorrenza programmato è di 26 minuti e quello simulato è di 24 minuti e 05 secondi.

## 6.5 Simulazione 4

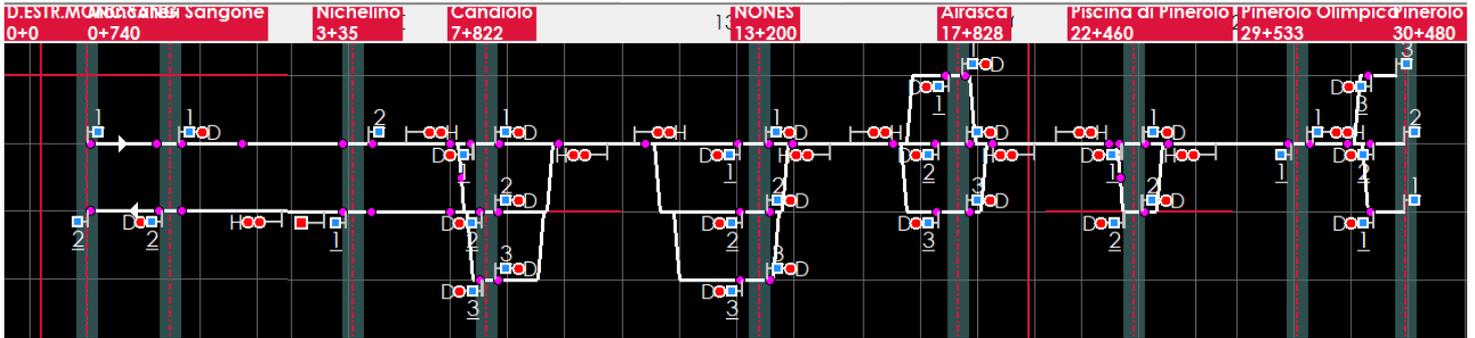


Figura 52 Infrastruttura simulazione 4

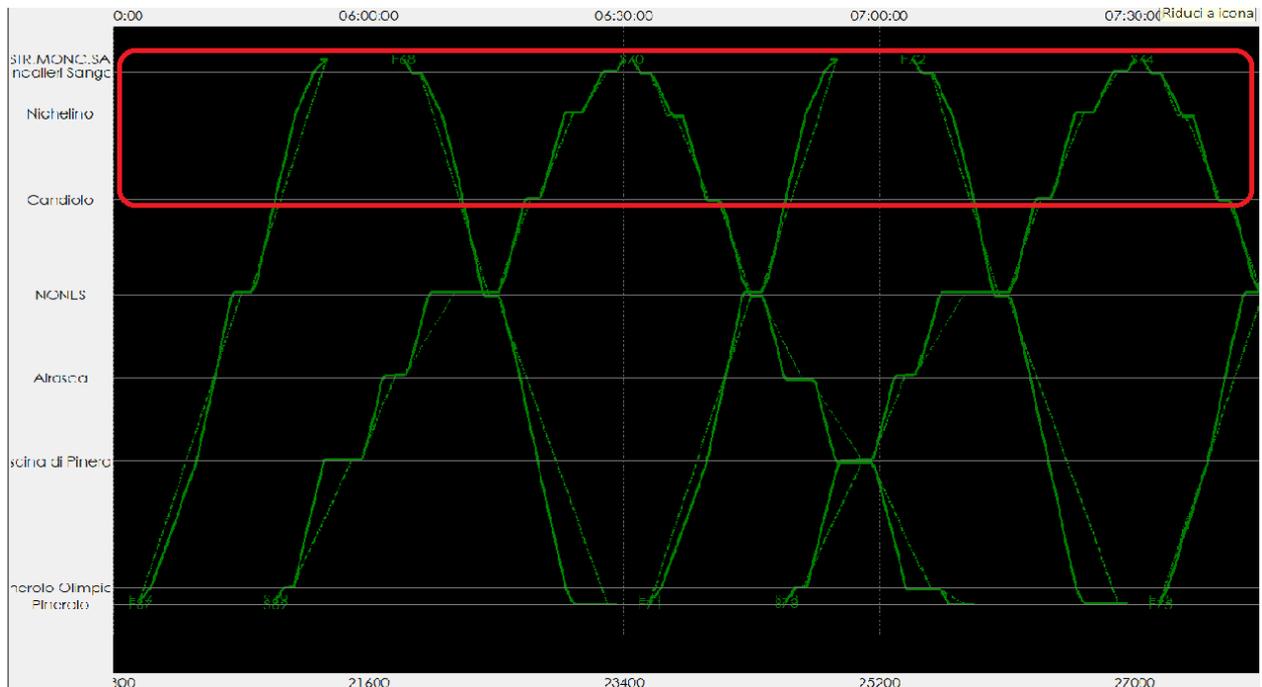


Figura 53 Orario grafico simulazione 4

In questo scenario il tempo di percorrenza programmato per i treni con missione veloce è di 23 minuti, mentre quello simulato è di 22 minuti e 02 secondi. Per i treni con missione lenta il tempo di percorrenza programmato è di 26 minuti e quello simulato è di 24 minuti e 01 secondi.

## 6.6: Simulazione 5

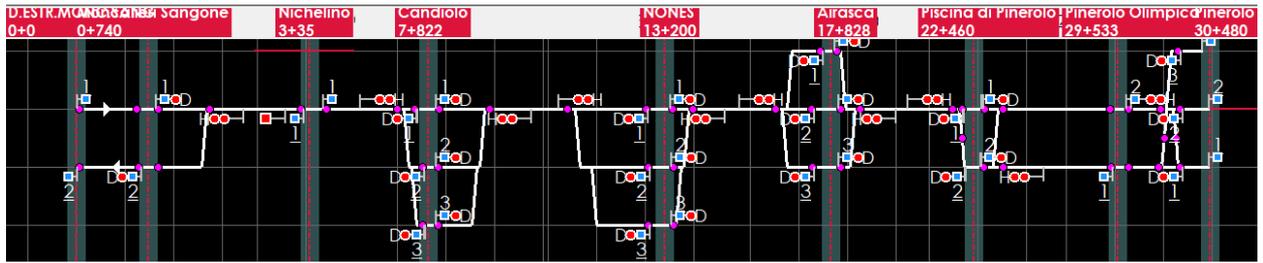


Figura 54 Infrastruttura simulazione 5

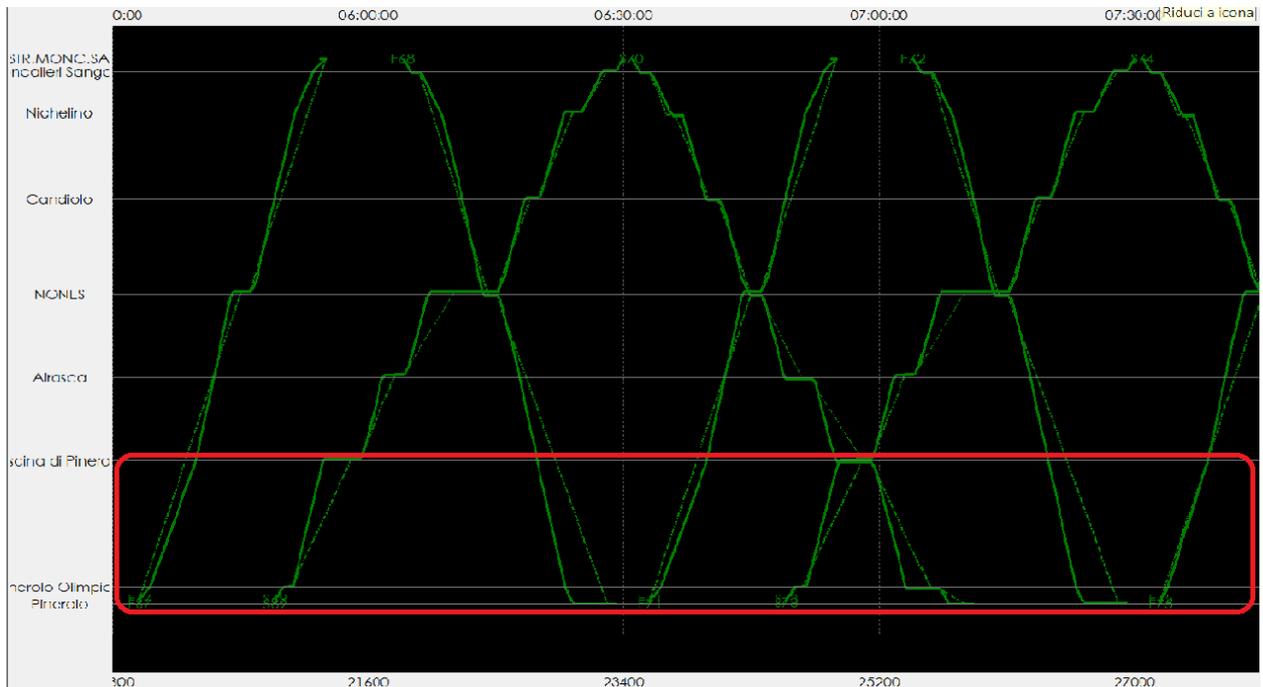


Figura 55 Orario grafico simulazione 5

Il tempo di percorrenza programmato per i treni con missione veloce è di 23 minuti, mentre quello simulato è di 22 minuti. Per i treni con missione lenta il tempo di percorrenza programmato è di 26 minuti e quello simulato è di 23 minuti e 58 secondi.

## 6.7 Simulazione 6

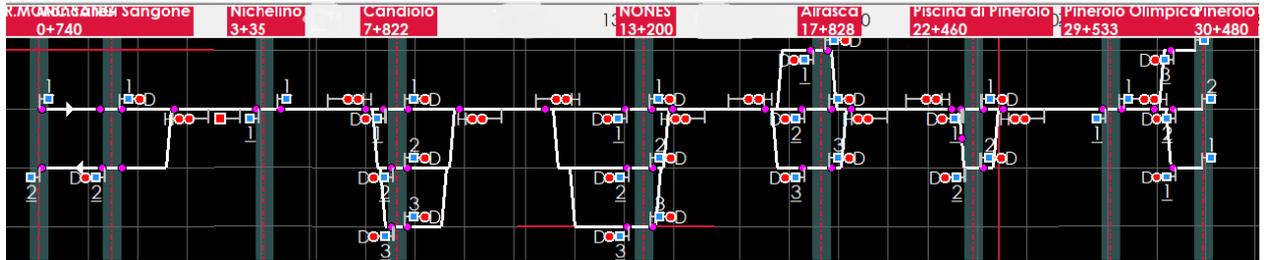


Figura 56 Infrastruttura simulazione 6

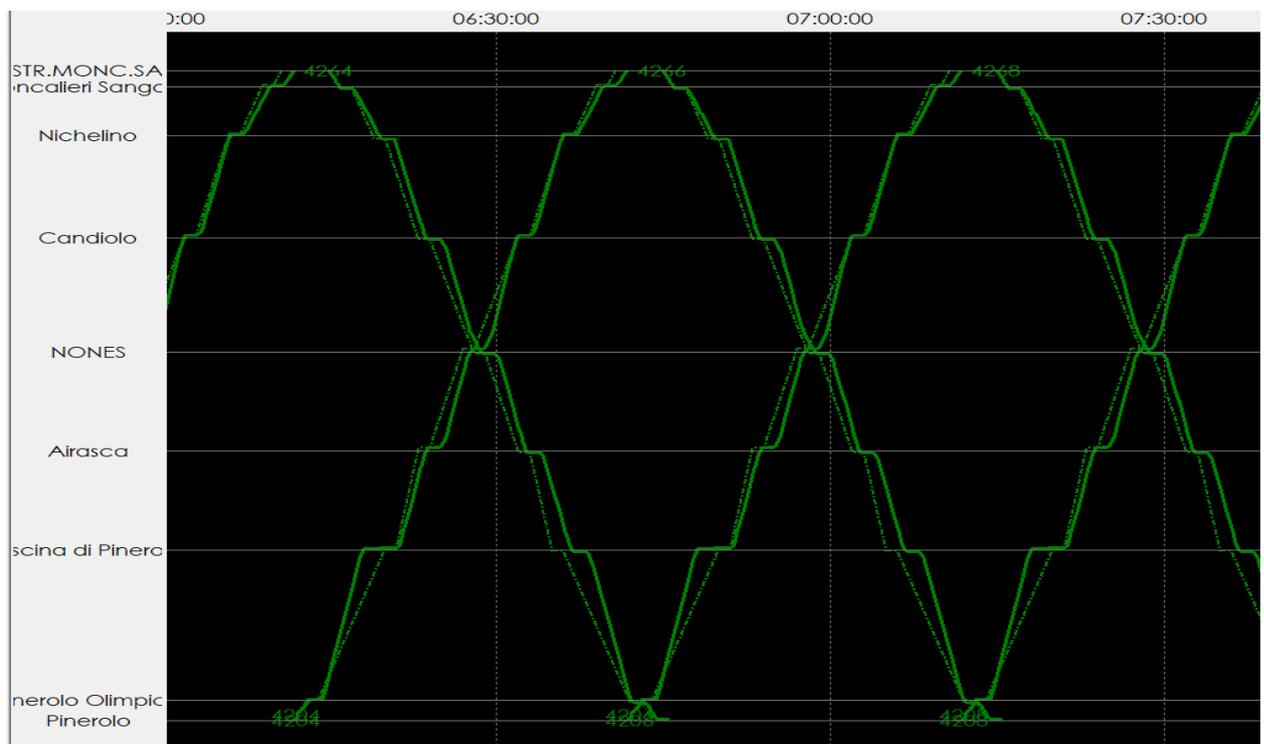


Figura 57 Orario grafico simulazione 6

In questo scenario il cadenzamento limite porta ad un tempo di percorrenza programmato di 21 minuti, mentre quello simulato è di 20 minuti e 28 secondi.

## Capitolo 7: Analisi dei risultati

Come si è già accennato nei capitoli precedenti, il presente lavoro di Tesi è un'analisi multi-scenario, 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, si è proceduto al confronto di tutti gli scenari simulati per comprendere al meglio quali sono quelli con prestazioni migliori. Le prestazioni di nostro interesse sono quelle riferite all'intera linea, quindi la capacità, la stabilità e i tempi di percorrenza.

### 7.1 L'Output

Di seguito verranno presentati i risultati ottenuti dallo studio degli output forniti dalle simulazioni di tutti gli scenari. Come enunciato in precedenza, ogni simulazione presentata è stata ripetuta 30 volte e questa necessità deriva dal fatto che analizzare maggiori volumi di dati, migliora i risultati che si possono ottenere dall'analisi degli stessi.

Ad ogni simulazione l'output (*Figura 56*) fornito dal software SASTRE fornisce, per fare un parallelismo, dei dati molto simili all'interfaccia delle Piattaforma Integrata di Circolazione.

%%clD	locID	schArr	schDep	schPlt	simExpID:	simExpID:	simExpID:
4200	Pinerolo	20520	20520		-22	-22	2
4200	Pinerolo C	20580	20640		-17	0	1
4200	Piscina di I	21000	21060		-4	1	2
4200	Airasca	21180	21240		6	1	2
4200	NONES	21420	21480		-3	1	1
4200	Candiolo	21720	21780		-46	28	1
4200	Nichelino	21960	22020		30	0	1
4200	Moncalier	22140	22200		6	1	2
4200	D.ESTR.MO	22240	22270		5	5	2
4204	Pinerolo	22320	22320		-78	-78	2
4204	Pinerolo C	22380	22440		-73	0	1
4204	Piscina di I	22800	22860		-4	1	2
4204	Airasca	22980	23040		6	1	2
4204	NONES	23220	23280		-3	1	1
4204	Candiolo	23520	23580		-46	1	1
4204	Nichelino	23760	23820		3	0	1
4204	Moncalier	23940	24000		6	1	2
4204	D.ESTR.MO	24040	24070		5	5	2
4206	Pinerolo	24120	24120		-52	-52	2

*Figura 58 Output di SASTRE*

Di fatto, troviamo il numero della corsa del treno, la località, il tempo di arrivo e partenza schedato, il ritardo/anticipo in arrivo, il ritardo/anticipo in partenza e il binario su cui sosta per poter permettere la salita e la discesa ai passeggeri.

## 7.2 Confronto tra gli scenari con Modello di esercizio A

Per comprendere meglio quale tipo di infrastruttura “rilassa” l’orario, quindi permette maggiore stabilità all’intera linea diminuendo la probabilità che si verifichino ritardi; iniziamo l’analisi del modello di esercizio A.

Il modello di esercizio A è stato inserito nella Simulazione 0, 1 e 2; procediamo al confronto mettendo in evidenza l’evoluzione del ritardo medio delle corse, lungo il percorso effettuato (andata e ritorno).

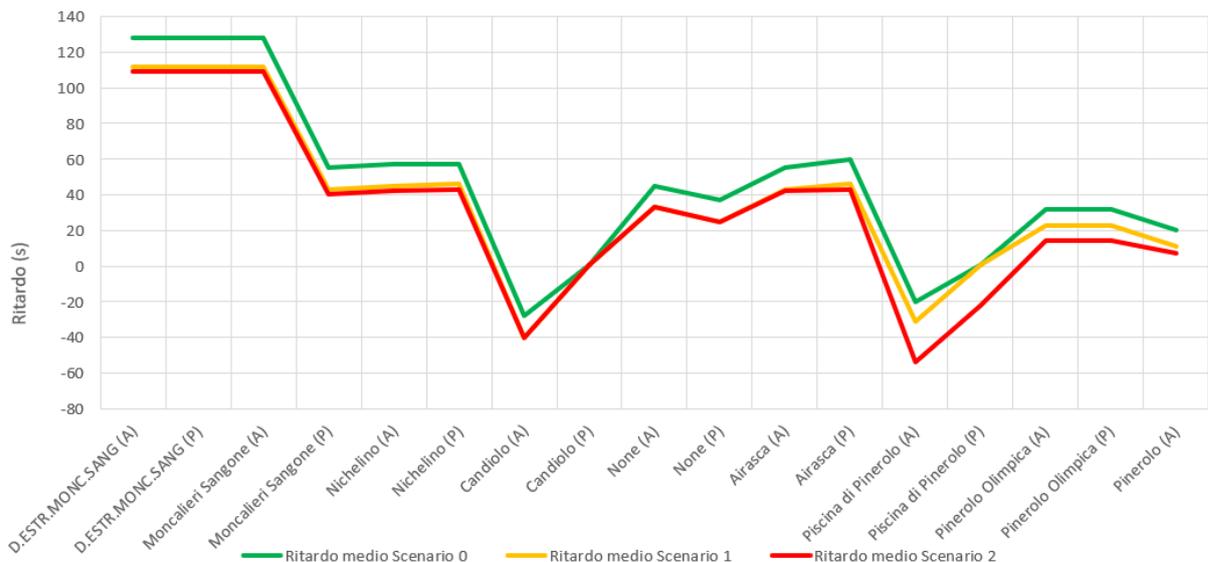


Figura 59 Confronto scenario 0, 1 e 2 in direzione Pinerolo

Esaminando il primo grafico, appare immediatamente chiaro che anche con diverse tipologie di infrastruttura l’andamento sia molto simile.

L’andamento del tracciato non è molto regolare, riscontriamo due minimi in corrispondenza della stazione di Candiolo e Piscina di Pinerolo; il ritardo negativo/anticipo che riscontriamo in queste due stazioni è dovuto al *buffer time*, tempo cuscinetto, inserito durante la programmazione dell’orario per cautela nei confronti del ritardo che potrebbe generarsi durante le manovre di incrocio.

Interessante è il ritardo all'ingresso del sistema, infatti mediamente tutti i treni provenienti dal Nodo di Torino arrivano con 110/130 secondi di ritardo rispetto al programmato, circa 2 minuti.

Questo ritardo viene assorbito durante il tragitto, si deduce che la linea abbia una buona capacità di recuperare il ritardo in ingresso, almeno per tutti i ritardi primari di ordine minore.

Attraverso le due tipologie di raddoppio, sia quello che va da Moncalieri Sangone a Candiolo (Scenario 1) sia quello che va da Pinerolo a Piscina di Pinerolo (Scenario2), purtroppo non si evidenzino significativi miglioramenti sull'evoluzione del ritardo medio. Si nota, però, come il raddoppio tra Pinerolo e Piscina di Pinerolo oltre ad aumentare la capacità ferroviaria, migliori la stabilità dell'orario rispetto a tutti gli altri scenari. Infatti, l'anticipo nella stazione di Piscina di Pinerolo arriva fino ad 1 minuto.

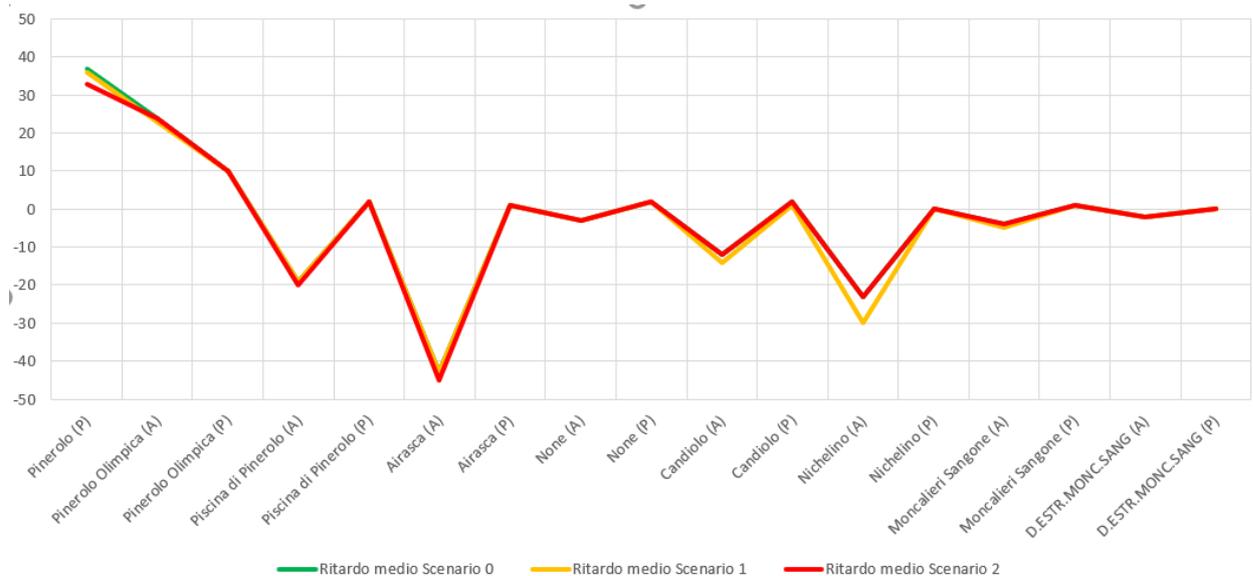


Figura 60 Confronto scenario 0, 1 e 2 in direzione Torino

L'andamento del ritardo in direzione Torino è praticamente identico per tutti e tre gli scenari, la causa probabile di questo risultato poco significativo è sia infrastrutturale che funzionale. Dal punto di vista infrastrutturale, l'impossibilità di modellizzare i passaggi a livello esclude la computazione di ritardi provocati dagli stessi P.L., mentre dal punto di vista funzionale bisogna considerare che a fronte di modifiche infrastrutturali che aumentano la capacità ferroviaria il modello di esercizio è sempre lo stesso, quindi l'orario di partenza (descritti nel timetable) sono vincolate alla stessa per ogni stazione anche se cambia l'infrastruttura.

### 7.3 Confronto tra gli scenari con Modello di esercizio B

Passiamo al confronto degli scenari infrastrutturali in presenza del modello di esercizio B (base), quello proposto da Trenitalia nell'offerta per la gestione del servizio ferroviario metropolitano.

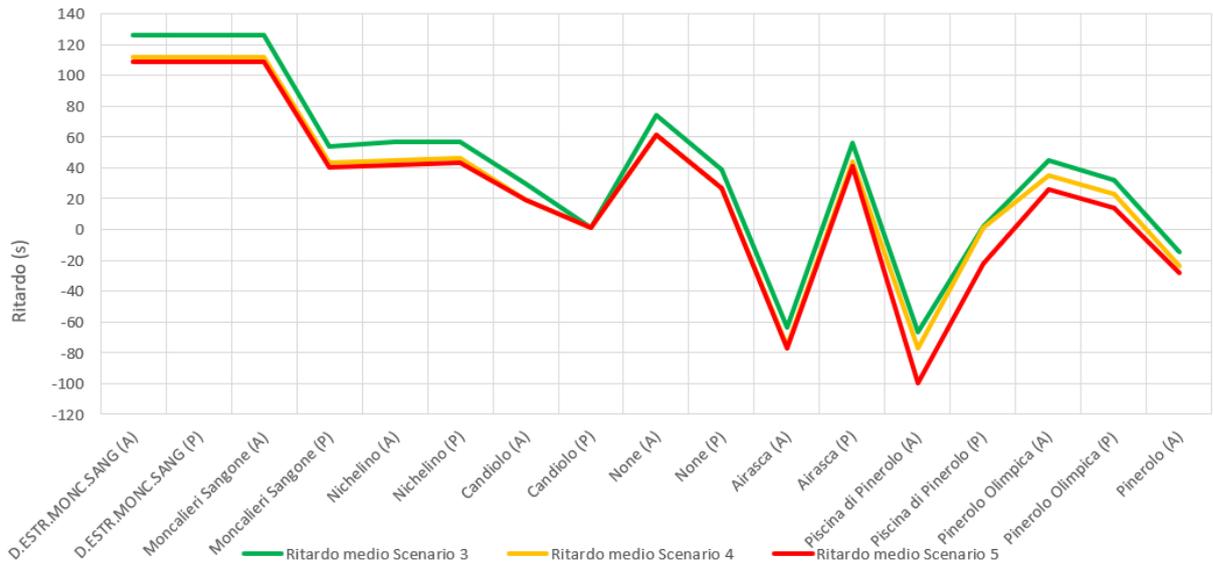


Figura 61 Confronto scenario 3, 4 e 5 in direzione Pinerolo

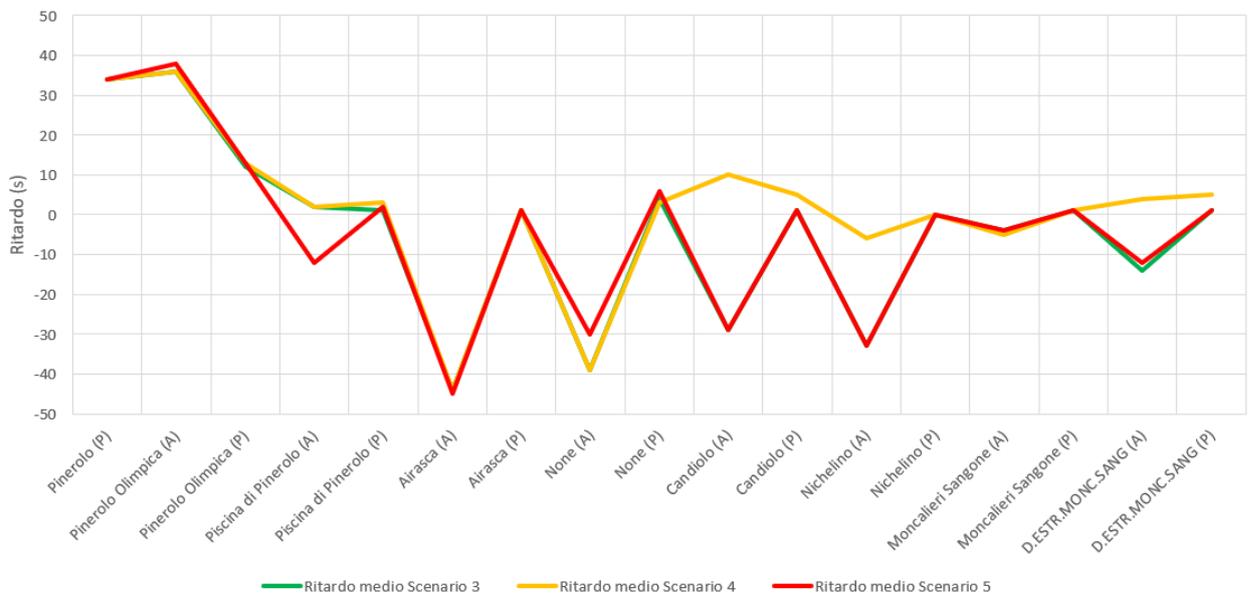


Figura 62 Confronto scenario 3, 4 e 5

Esaminando i due grafici, si nota come il modello di esercizio B sia molto irregolare in entrambe le direzioni. Si notano elevati anticipi dell'ordine di 1 minuto in molte stazioni; a

differenza del paragrafo precedente dove gli anticipi erano necessari per poter fronteggiare eventuali ritardi dovuti agli incroci, in questo caso risultano improduttivi. Dai frequenti anticipi consegue che il tempo di sosta si allunghi, poiché la partenza in anticipo non è consentita. In questo caso la stabilità aumenta molto ma va discapito della capacità ferroviaria residua rispetto al modello di esercizio A.

## 7.4 Confronto tra il modello di esercizio C e quello “As-is”

Il modello di esercizio C che è stato costruito per mettere in evidenza i miglioramenti che si avrebbero dal raddoppio parziale. Il raddoppio su cui calza meglio è quello tra Pinerolo e Piscina di Pinerolo. In questo paragrafo verrà confrontato lo scenario di Simulazione 6 con lo scenario di Simulazione 0.

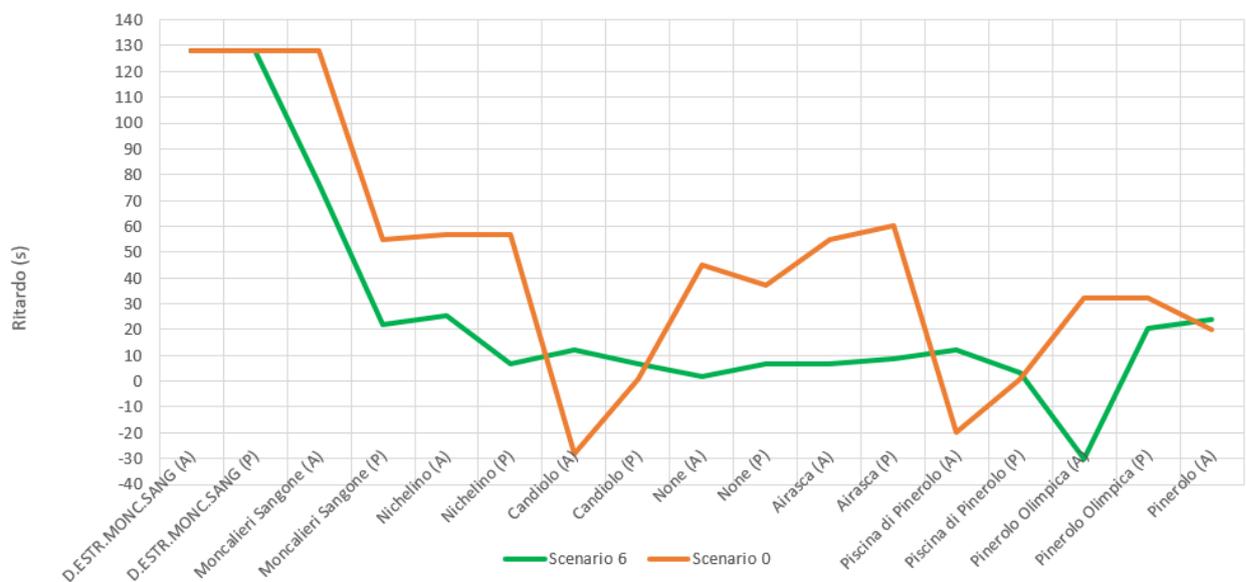


Figura 63 Confronto scenario 0 e 6

Il tracciato della linea verde rappresenta il ritardo medio del modello di esercizio C con il raddoppio tra Pinerolo e Piscina di Pinerolo, mentre il tracciato della linea arancio rappresenta il ritardo medio del modello di esercizio A con l'infrastruttura attualmente esistente.

Anche se gli scenari cambiano l'input del sistema sul ritardo in ingresso è lo stesso, infatti compare un ritardo di circa 2 minuti. In questo confronto appare evidente come la regolarità del tracciato sia nettamente superiore nello scenario 6. Le cause di questo aumento di regolarità sono due:

- il raddoppio infrastrutturale che ha portato un aumento della capacità;
- la programmazione dell'incrocio in contemporanea a None.

Con il modello di esercizio A la necessità di effettuare i due incroci e l'inserimento dei *buffer time* porta ad un tempo di percorrenza dell'intera tratta di 28 minuti, mentre con il raddoppio e la nuova griglia di cadenzamento si arriva ad un tempo di percorrenza di 21 minuti.

## Capitolo 8 Conclusioni

La tesi ha presentato l'analisi di capacità effettuata sulla Ferrovia Pinerolese, una ferrovia suburbana a binario singolo con orario cadenzato. L'analisi è stata condotta tramite un approccio di studio basato sugli orari, un cui la capacità è stimata tramite il numero di tracce giornaliere. Nel *Capitolo 4* si è fornita una panoramica del metodo utilizzato descrivendo l'ambiente di micro-simulazione e introducendo la differenziazione tra scenari operativi e infrastrutturali nel *Capitolo 5* e *6*.

I risultati presentati nel *Capitolo 7* evidenziano come lo scenario infrastrutturale che presenta un raddoppio parziale migliori la capacità disponibile, fornendo la possibilità di modificare anche radicalmente l'orario d'esercizio.

Focalizzando l'attenzione sul livello della qualità del servizio offerto, il raddoppio selettivo migliora i margini di recupero della puntualità in presenza di propagazione del ritardo e/o attenua le perturbazioni sull'orario.

I due raddoppi selettivi ipotizzati non necessariamente devono seguire il tracciato attuale; come esaminato in precedenza la linea presenta 28 passaggi a livello, i quali sono fonte di ritardo e della sua propagazione. Risulta necessario, in caso di realizzazione del raddoppio, l'eliminazione dei passaggi a livello per poter ottenere il massimo rendimento derivante dal raddoppio. Per poter procedere con l'eliminazione dei passaggi a livello è necessario effettuare uno studio di fattibilità sull'interramento della linea o uno studio sulla modifica del tracciato o uno studio sulla progettazione di un sovrappasso veicolare; pur non avendo conoscenze tecniche per poter effettuare questi studi di fattibilità, ma conoscendo profondamente il territorio, sembrerebbe poco realizzabile l'eliminazione di tutti e 28 i passaggi a livello. L'eliminazione di alcuni passaggi a livello che incrociano con un percorso di bassa fruizione veicolare potrebbe essere fattibile, troncando il percorso stradale; ma praticamente non apporterebbe benefici all'esercizio ferroviario in termini di riduzione del ritardo, poiché essi hanno una bassissima, se non quasi nulla, correlazione sulla propagazione delle perturbazioni.

Alla luce dello studio effettuato la principale criticità emersa, seguendo l'attuale conformazione del servizio è l'incrocio dei treni a Piscina di Pinerolo e, nelle ore di punta anche a Candiolo. Esaminando i due raddoppi ipotizzati viene eliminato un incrocio ma il raddoppio tra Moncalieri e Candiolo interessa meno treni e comporta l'intervento sull'area urbana di Nichelino. Con un raddoppio parziale sulla tratta che va da Pinerolo a Piscina di Pinerolo si ha una maggiore libertà nella programmazione del sistema cadenzato per cui è possibile portare il punto di incrocio a None, come è stato ipotizzato nel modello di esercizio C.

Con la sola modifica del raddoppio fino a Piscina si nota una diminuzione dei tempi di percorrenza, nell'intorno dei 2 minuti, e una migliore gestione delle perturbazioni.

Con l'introduzione del modello di esercizio C, si otterrebbe un servizio caratterizzato da:

- Incrocio a None in contemporanea
- Minore percorrenza per eliminazione di un incrocio
- Maggiore regolarità
- Aumento della capacità utilizza con conseguente aumento della frequenza di treni al giorno

Prendendo in considerazione il modello di esercizio B, esso appare discontinuo circa la regolarità del servizio, seppur comportando una lieve diminuzione del tempo di percorrenza. Inoltre, Il servizio misto lento-veloce comporta una riduzione del servizio per gli utenti delle località intermedie rispetto alla struttura di orario attuale. Questa scelta non è priva di criticità, dal momento che, escludendo Pinerolo, le altre località movimentano un numero di passeggeri tutt'altro che trascurabile, circa un terzo di un terzo di quelle che salgono a Pinerolo.

Dal punto di vista metodologico si conferma come l'attuale esercizio ferroviario sia 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). In presenza di raddoppio la pianificazione di modelli di esercizio basati su griglie di cadenzamento risulta una scelta appropriata e compatibile per massimizzare il servizio offerto derivante dalle modifiche infrastrutturali. 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.

## Bibliografia

- Abril, M., Barber, F., Ingolotti, L., Salido, M. A., Tormos, P., & Lova, A. *An assessment of railway capacity. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2008.
- Agenzia della Mobilità Piemontese, *Progetto di Servizio Ferroviario*, Torino, 2016.
- Ballatore, L. *La Torino-Pinerolo*, in *Storia delle ferrovie in Piemonte*, Torino, Il Punto, pp. 48-50. 2002.
- Briano, I. *Storia delle ferrovie in Italia*, 1° Vol., Milano, Editore Cavallotti, 1977.
- Ciuffini Francesca, *Orario ferroviario. Integrazione e connettività*, CIFI, 2019.
- Corriere, F. *Potenzialità e regolarità di esercizio nelle linee ferroviarie*. *Ingegneria Ferroviaria*, 1982.
- Coviello, N. *Timetable-based capacity evaluations: Analysis of a sub-urban single-Track railway*. *Ingegneria Ferroviaria*, 73, 287-319, 2018.
- Coviello, N., Pellegrini, P., Sobieraj, S., & Rodriguez, J. *Stability of saturated timetables: the influence of buffer times*. In *7th International Conference on Railway Operations Modelling and Analysis-Rail Lille*, 2017.
- Coviello, N. «Dispense di Segnalamento e capacità dei sistemi ferroviari» 2019.
- Dalla Chiara, B. «Slide del corso: "Sistemi di trasporto e logistica esterna",» 2019.
- Fiche UIC 406: Capacity as such does not exist. Railway infrastructure capacity depends on the way it is utilized.
- Genovesi P. – Ronzino C.D - *Flussi e capacità delle linee ferroviarie a doppio binario*, *Ingegneria Ferroviaria*, 2006.
- Guadagno V., *Ferrovia ed economia nell'Ottocento post-unitario*, Roma, Edizioni CAFI, 1996.
- Guida P. L., Eugenio Milizia, *Dizionario ferroviario*. Movimento, Circolazione, Impianti di segnalamento e sicurezza, 2006.
- Istituto dell'Enciclopedia Italia Giovanni Treccani, "Enciclopedia Treccani", Voce "Ferrovia", Edizione 1949, Roma.
- Loria, M. *Storia della trazione elettrica ferroviaria in Italia*, Firenze, Giunti-Barbèra, 1971.
- Mayer, L. *Impianti Ferroviari*, Volume 1 e 2, Roma, CIFI, 2004.

Murolo, F. dispense 'Appunti di trazione elettrica' 2015.

Perinetti, F. *Piccola enciclopedia dei treni*, Milano, Massimo Editore, 1974.

Petersen E.R *Capacity of a single track rail line*, School of Business Working Paper No. 77-38, Queen's University, Kingston, 1974.

Rete Ferroviaria Italiana, *Regolamento per la Circolazione dei Treni*, 2009.

Rete Ferroviaria Italiana, *Regolamento sui Segnali in uso sull'infrastruttura*, 2016.

Ricci S, *Trasporti ferroviari*, dispense del corso , università di Roma "sapienza", 2012.

Robert, G. *Le ferrovie nel mondo*, Milano, Vallardi, 1964.

Vicuna, G. *Organizzazione e tecnica ferroviaria*, CIFI, 1993.

Villari, R. *Storia contemporanea*, 1° ed., Roma - Bari, Editori Laterza, 1970, 5° ed., 1984.

## Sitografia

<http://www.cifi.it/UpIDocumenti/Bologna/ConvegnoCIFI.pdf>. *Ferrovie concesse*; dicembre 2020.

<https://cronologia.leonardo.it/ferrovie/ferrovie.html>, *Breve storia delle ferrovie*, dicembre 2020.

[http://www.loescher.it/librionline/risorse\\_vagamondo/download/regioni/piemonte\\_carta\\_dati.pdf](http://www.loescher.it/librionline/risorse_vagamondo/download/regioni/piemonte_carta_dati.pdf), *Infrastruttura ferroviaria Piemonte*, gennaio 2021.

<http://www.fondazionefs.it>, *Archivio rotabili*, gennaio 2021.

[http://www.fsnews.it/cms-file/allegati/fsnews/jazz\\_brochure.pdf](http://www.fsnews.it/cms-file/allegati/fsnews/jazz_brochure.pdf). *Caratteristiche treni Jazz*, febbraio 2021.

[http://www.provincia.torino.gov.it/culturamateriale/doc/\\_doc.html](http://www.provincia.torino.gov.it/culturamateriale/doc/_doc.html). *Nodo di Torino*, febbraio 2021.

<http://www.sfmtorino.it/>, *Sfm linea 2*, marzo 2021.

# Ringraziamenti

Al termine di questa esperienza di tesi e di studio al Politecnico sono molte le persone e le realtà che ci terrei a ringraziare.

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.

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 e la distanza.

Ringrazio l'agenzia della Mobilità Piemontese, in particolare l'Ing. Paonessa e l'Ing. Andrea Stanghellini per avermi dato la possibilità di effettuare questo studio.

Ringrazio la società Rete Ferroviaria Italiana S.p.A., appartenente al gruppo Ferrovie dello Stato Italiane, in particolare nella figura dell'Ing. Ernesto Vizza, nonché dello Ing. Valerio Operti, per avermi consigliato.

Un ringraziamento particolare va a tutti quei fantastici trii che mi hanno accompagnato durante il mio percorso non solo al Politecnico ma anche nella vita.

Ultima, ma non per importanza, vorrei ringraziare tutta la mia splendida famiglia.