

POLITECNICO DI TORINO

**Corso di Laurea Magistrale
in Ingegneria Civile**



Tesi di Laurea Magistrale

**Analisi e simulazione delle prestazioni e dei
consumi energetici di una metropolitana
automatica: il caso della linea
*“Hastane-Soyak”***

Relatore

Prof. Bruno DALLA CHIARA

Correlatrice esterna

Ing. Federica DANISE (Geodata)

Candidato

Salvatore BARBATO

Ottobre 2018

Abstract

Nowadays urban motorized mobility is living a moment of significant changes. The actual needs of society require continuous innovation of urban motorized mobility, focusing the attention of innovators on several challenges and objectives. Some of the most relevant ones are the electrification of vehicles namely for urban transport, high frequency and efficiency of public transport services and, consequently, the reduction of vehicular congestion together with of the atmospheric pollution. These three aspects have led an increasing number of dimensionally relevant urban administrations to invest on one type of rapid mass transportation: the underground. In particular, the automated underground lines cover a central role in this scenario. It is important to analyze the main performance indexes of trains in operation, which generally include safety, punctuality, energy consumption, high frequency of the service, comfort of passengers and sharp target stops at the stations distributed along the lines. Among them, energy efficiency is one of the major goals for most of rail administrations, since this involves both economic and in indirect environmental reasons. The main aim of this Master Thesis is to simulate the operation, with related working process, of a driverless underground on a real line under construction in the city of Istanbul, in order to verify the feasibility of the design and to assess the level of main performance parameters under changing service conditions of this transport system. The studied parameters are the travel times of trains needed to cover the distance of the whole line, the related power consumption and the management of the fleet circulation in the event of any breakdown related to rolling stock material. The work is organized as follow: an initial overview concerning the generality of rail transport for metropolitan use is reported; it is focused on the different classifications, on signaling systems, on the various level of automation with related innovations. The presented case study of the Hastane-Soyak line has been processed through different simulations carried out with the OpenTrack software package, provided by the Politecnico di Torino (DIATI – Department of Environment, Land and Infrastructure Engineering – Transport systems section) and widely established in industry, service and research communities. The research is based on data coming from the railway infrastructure and the rolling stock, taking into account the minimum distance between two subsequent vehicles (headway). Finally, results and conclusions coming out from various simulations under different service conditions are presented in order to estimate the optimal trade-off between the minimum energy consumption and the maximum available performance level.

Sommario

L'esigenza di fronteggiare numerosi recenti obiettivi caratterizzanti la mobilità motorizzata urbana, quali l'elettrificazione dei veicoli, i servizi frequenti nel trasporto pubblico, la necessità di diminuire la congestione veicolare stradale e l'inquinamento atmosferico sulle città, ha condotto sempre più aree metropolitane - in tutto il mondo - a investire su un tipo di trasporto rapido di massa quale la metropolitana. In particolare, la frequenza elevata e la necessità di contenere i consumi energetici spingono verso linee metropolitane automatiche. La sicurezza, l'elevata frequenza di passaggio, il rispetto del cadenzamento, l'energia consumata, l'arresto a bersaglio presso le stazioni dislocate lungo la linea ed il comfort del viaggiatore rappresentano sovente i principali indici prestazionali relativi la corsa di un convoglio. L'efficienza energetica risulta essere recentemente l'obiettivo principale di molte amministrazioni ferroviaria, sia in termini economici che indirettamente ambientali.

Lo scopo di questo elaborato di tesi consiste nell'applicazione di servizi di un sistema di trasporto metropolitano senza macchinista su una linea in costruzione appartenente alla città di Istanbul, al fine di verificare la fattibilità di progettazione e l'identificazione dei parametri prestazionali principali in differenti condizioni d'esercizio. In particolare, sono stati analizzati i tempi di corsa necessari ai treni per coprire la distanza dell'intera linea, i consumi energetici ad essi connessi e la gestione della circolazione ferroviaria in caso di eventuali guasti al materiale rotabile. A tal fine è stata effettuata un'iniziale panoramica sulle generalità del trasporto ferroviario di tipo metropolitano, in particolare sulle classificazioni, sui sistemi di segnalamento e sui vari livelli di automazione con connesse innovazioni.

Il caso-studio presentato, relativo alla linea *Hastane-Soyak*, è stato elaborato attraverso diversi processi di simulazione eseguiti mediante l'ausilio di un software in dotazione al Politecnico di Torino (DIATI-Area Trasporti), ampiamente utilizzato anche nell'industria e nei centri di ricerca: OpenTrack. La ricerca si sviluppa a partire dai dati sull'infrastruttura ferroviaria, sul materiale rotabile ed il distanziamento minimo tra i veicoli successivi (*headway*); prosegue con la simulazione di varie ipotesi di esercizio. Infine si espongono le conclusioni sui risultati pervenuti dai vari processi di simulazione in differenti condizioni di esercizio applicati al caso in esame al fine di ottenere la condizione ottimale in grado di garantire minimi consumi energetici e massime prestazioni, in termini di livello di servizio offerto.

Indice

1. Premessa.....	11
1.2. Descrizione del lavoro.....	12
2. Trasporto ferroviario ad uso metropolitano	14
2.1. Generalità sul trasporto ferroviario ad uso metropolitano	14
2.1.1. Origini e progresso del trasporto metropolitano	15
2.1.2. Classificazione dei sistemi di trasporto collettivo ad impianto fisso	18
2.1.3. Sistemi innovativi: la metropolitana <i>driverless</i>	22
2.1.4 Stato dell'arte	25
2.2. Locomozione ferroviaria	32
2.2.1. Meccanica della locomozione ferroviaria	32
2.2.2. Velocità commerciale e parametri fondamentali	46
2.2.3.1. Accelerazione	50
2.2.3.2. Regime	51
2.2.3.3. <i>Coasting</i>	52
2.2.3.4. Frenatura.....	55
2.2.2. Capacità e potenzialità di una linea	56
2.3. Segnalamento e automazione	58
2.3.1. Caratteristiche dei sistemi di segnalamento	58
2.3.2. Segnalamento a blocco fisso	60
2.3.3. Segnalamento a blocco mobile.....	62
2.3.4. Livelli di automazione.....	65
3. Presentazione e sviluppo caso studio	67
3.1. Linea <i>Hastane Soyak</i>	67
3.2. Strumento di simulazione OpenTrack.....	69
3.3. Infrastruttura e sistema di segnalamento della linea <i>Hastane-Soyak</i>	73

3.4. Materiale rotabile	75
3.5. Tabelle orarie.....	80
3.6. Analisi relativa alla fase di <i>coasting</i>	81
3.7. Metodologia di calcolo e di valutazione dei dati energetici.....	85
4. Risultati	88
4.1. Valutazioni delle prestazioni e dei consumi in “ <i>Normal conditions</i> ”	88
4.2. Valutazioni delle prestazioni e dei consumi in “ <i>Eco-Mode conditions</i> ”	92
4.3. Valutazioni sugli effetti causati da guasti al materiale rotabile	96
4.4. Efficienza energetica di sette sottostazioni in condizioni standard.....	98
5. Conclusioni.....	101
6. Bibliografia.....	104

Indice delle figure

Figura 1: Potenzialità di diversi sistemi di trasporto.....	14
Figura 2: <i>London Underground of 1872</i>	15
Figura 3: Monorotaia con sistema Alweg presso Disneyland Florida	16
Figura 4: Principali sistemi di metropolitane a guida automatica	17
Figura 5: Parametri tecnico-operativi per classi di trasporto proposti da Vuchic [4]	20
Figura 6: Classificazione dei sistemi di trasporto collettivo con motore di trazione a bordo a guida vincolata	21
Figura 7: Trend evolutivo km linee metropolitane automatiche[5]	24
Figura 8: Ruota motrice, coppia motrice, trazione [20].....	32
Figura 9: Interazione tra ruota motrice-rotaiia [20].....	34
Figura 10: Interazione ruota frenata-rotaiia [20].....	35
Figura 11: Determinazione coefficiente aderenza con prove sperimentali [21]	36
Figura 12: Determinazione del coefficiente di aderenza al variare della velocità [20].....	37
Figura 13: Resistenza al rotolamento [20]	38
Figura 14: valori di resistenza specifica in kg/ton per cuscinetti a strisciamento e rotolamento [22].....	39
Figura 15: Coefficienti sperimentali usati per calcolare resistenze ordinarie [23]	41
Figura 16: Resistenza addizionale per livelletta.....	42
Figura 17: Atteggiamento del carrello in curva [20].....	43
Figura 18: Caratteristica meccanica di trazione [24]	45
Figura 19: Caratteristica meccanica reale di trazione [24].....	45
Figura 20: Influenza del tempo di sosta alle fermate sulla velocità commerciale, al variare velocità massima	46
Figura 21: Diagramma di trazione standard [2]	47
Figura 22: Velocità commerciale in funzione della velocità massima, distanziamento tra fermate e relativi consumi energetici [2].....	48

Figura 23: Cicli standard del moto	50
Figura 24: Distanziamento piccolo tra fermate successive	51
Figura 25: Fase di regime.....	51
Figura 26: Relazione tra velocità massima, velocità commerciale e distanza tra le fermate [2]	52
Figura 27: Confronto dei consumi energetici nelle varie fasi di un diagramma del moto [2] .	53
Figura 28: Consumo energetico in funzione durata del <i>coasting</i> [2]	54
Figura 29: Profilo del sistema di blocco [14].....	59
Figure 30: Sistema di segnalamento a blocco automatico	60
Figura 31: Trasmissione discontinua delle informazioni [15]	61
Figura 32: Distanziamento dei treni con sistema di segnalamento a blocco fisso e blocco mobile	62
Figura 33: Sistema di comunicazione dati CBTC [17]	63
Figura 34: Sistema di ventilazione in una linea metropolitana [18]	64
Figura 35: Differenti livelli di automazione [5]	66
Figura 36: Linea <i>Hastane-Soyak</i>	69
Figura 37: OpenTrack simulation: Input and Output [25]	70
Figura 38: Esempio Layout di tracciato OpenTrack [25]	71
Figura 39: Gestione del materiale rotabile in OpenTrack [25]	72
Figura 40: Timetable Opentrack [25].....	72
Figura 41: Diagramma <i>gradient/distance</i> linea <i>Hastane-Soyak</i>	73
Figura 42: Layout tracciato linea <i>Hastane-Soyak</i>	74
Figura 43: Sforzo di trazione / profilo di velocità di un singolo veicolo motorizzato	76
Figura 44: Impostazioni dei dati relativi ai treni in OpenTrack	77
Figura 45: Diagrammi resistenza / distanza linea <i>Hastane Soyak – Soyak Hastane</i>	79
Figura 46: Diagramma fase di <i>coasting</i>	81
Figura 47: Diagramma tempo-spazio (caso a)	83
Figura 48: Diagramma tempo-spazio (caso b)	84

Figura 49: Diagramma velocità-tempo (caso a).....	84
Figura 50: Diagramma velocità-tempo (caso b).....	85
Figura 51: Esempio di distanza relativa tra treni e sottostazioni.....	87
Figura 52: Diagramma velocità/distanza relativo alla direzione <i>Hastane- Turnback Soyak</i> in <i>Normal conditions</i>	90
Figura 53: Diagramma velocità/distanza relativo alla direzione <i>Turnback Soyak-Hastane</i> in <i>Normal conditions</i>	90
Figura 54: <i>Train Diagram</i> in <i>Normal conditions</i> con 90 s di <i>headway</i>	91
Figura 55: Diagramma velocità/spazio relativo alla direzione <i>Hastane-Turnback Soyak</i> in <i>Eco-Mode conditions</i>	92
Figura 56: Diagramma velocità/spazio relativo alla direzione <i>Turnback Soyak - Hastane</i> in <i>Eco-Mode conditions</i>	93
Figura 57: <i>Train Diagram</i> in <i>Eco-Mode conditions</i> con 90 s di <i>headway</i>	95
Figura 58: Localizzazione degli scambi sulla linea <i>Hastane-Soyak</i>	96
Figura 59: <i>Train Diagram</i> in caso di guasto sulla sezione 2-3.....	97
Figura 60: <i>Train Diagram</i> relativo al guasto di un treno guidato manualmente a 15 Km/h dalla Station 3 alla zona di ricovero.....	98
Figura 61: Potenza erogata da ogni sottostazione in condizione standard.....	99
Figura 62: Consumo totale di potenza necessaria ad alimentare l'intera linea.....	100

Indice delle Tabelle

Tabella 1: “ <i>Application of Genetic Algorithms for Driverless Subway Train Energy Optimization [8]</i> ”	26
Tabella 2: “ <i>Potential Benefits and Obstacles of Implementing Driverless Train Operation on the Tyne and Wear Metro: A Simulation Exercise [9]</i> ”	27
Tabella 3: “ <i>Increasing of Subway Lines Capability through Moving Block Signaling Systems: Modeling and Simulation [10]</i> ”	28
Tabella 4: “ <i>Coordinated train control in a fully automatic operation system for reducing energy consumption [11]</i> ”	29
Tabella 5: Caratterizzazione fase di esercizio	49
Tabella 6: Principali caratteristiche materiale rotabile	75
Tabella 7: <i>Timetable</i> itinerario 1 Linea <i>Hastane-Soyak</i>	80
Tabella 8: Posizione delle sottostazioni elettriche	87
Tabella 9: Prestazioni e consumi energetici in “ <i>Normal conditions</i> ”	89
Tabella 10: Tempistiche totali di viaggio	89
Tabella 11: Consumi energetici in “ <i>Normal conditions</i> ”	91
Tabella 12: Operazioni in “ <i>Eco-Mode conditions</i> ”	93
Tabella 13: Incrementi temporali e risparmi energetici.....	94
Tabella 14: Circolazione ferroviaria in caso di guasti alla linea.....	97

1. Premessa

Nel corso dell'ultimo secolo, la crescita urbana, associata ad un incremento della domanda relativa all'impiego dei trasporti pubblici, risulta essere un fattore determinante per l'avvio di numerosi studi aventi come obiettivo primario la ricerca di una politica di riqualificazione ambientale, oppure il raggiungimento della cosiddetta "crescita verde". Questo fenomeno coincide con un sistema di promozione, sviluppo e crescita economica, assicurando al tempo stesso che il patrimonio naturale continui a fornirci le risorse ed i servizi ambientali sui quali si basa il nostro benessere. A tale scopo è necessario accelerare gli investimenti e l'innovazione che rendono possibile una crescita sostenibile, dando vita a nuove opportunità economiche.

L'assestamento urbano dipende in modo considerevole dalla scelta delle infrastrutture di trasporto e, di conseguenza, le principali città ad avviato e costante sviluppo economico hanno deciso di intraprendere dei programmi di riordinamento dei modelli di trasporto e mobilità.

Gli spostamenti dalla città alla periferia comportano un ampliamento delle distanze da percorrere, ciò si collega ad un aumento del numero di veicoli posseduti e del traffico dei pendolari. Tra il 2005 e il 2025 è stato stimato [26] che il numero di viaggi compiuti quotidianamente a livello globale tenderà ad aumentare del 50%; di conseguenza tale condizione comporterà numerosi disagi per la mobilità urbana, quali: congestione del traffico, incidenti, aumenti dei consumi energetici, inquinamento atmosferico, ecc. Trovare una soluzione a questi problemi risulta essere fondamentale per migliorare la qualità di vita dei passeggeri e per far fronte alle sfide del futuro. Coadiuvare i servizi di trasporto pubblico collettivo con lo stile di vita dei cittadini comporta allo stesso tempo soddisfazione degli utenti e quindi maggiori ricavi. I paesi più sviluppati hanno avviato una nuova politica di mobilità locale, abbandonando la traiettoria del "*business as usual*" (BAU), focalizzando la loro attenzione su un moderno ed efficiente sistema di trasporto metropolitano, ovvero la "metropolitana ad automazione integrale" (AGT). La sicurezza garantita dai più recenti e sviluppati livelli di automazione (GoA) congiunta all'utilizzo di un performante sistema di segnalamento (blocco mobile), la qualità del servizio offerto, la maggior flessibilità operativa, i minori costi di gestione dovuti alla mancanza del personale di bordo, l'ottimizzazione dei consumi energetici, la possibilità di gestire l'entrata/uscita dei treni in modo da regolare il servizio nell'ora di punta, minori tempi di cantierizzazione delle opere civili all'interno di

contesti urbani e l'ottimizzazione della capacità della linea risultano essere alcuni dei punti chiave che contraddistinguono le “metropolitane *driverless*” dalle cosiddette “metropolitane convenzionali”.

1.2. Descrizione del lavoro

I sistemi ferroviari ad uso metropolitano, durante la fase di esercizio, consumano un'elevata quantità di energia elettrica, generando cospicue emissioni in termini di anidride carbonica. Negli ultimi anni, in seguito all'aumento dei prezzi dell'energia elettrica, il costo di quest'ultima ricopre un ruolo fondamentale nel costo complessivo dell'intero sistema metropolitano. Anche l'Unione Europea si è espressa a riguardo, sottolineando come l'efficienza energetica risulti essere il principale obiettivo di cui le amministrazioni ferroviarie devono tenere conto, sia in termini economici che indirettamente ambientali. Di conseguenza l'ottimizzazione dei consumi energetici assume un ruolo importantissimo. A tal proposito sono state implementate diverse strategie di efficienza, mediante l'utilizzo ottimale della frenata a recupero di energia e tramite l'uso di una guida ottimizzata (*Eco-mode*). Nel caso di metropolitane automatiche dotate di sistema ATO (*Automatic Train Operation*) il processo di guida in modalità ECO prevede il calcolo di un diagramma di trazione programmato in maniera tale da ottimizzare il rapporto consumi/prestazioni. In caso di sistemi metropolitani a guida manuale il tutto si riduce ad un comportamento subottimale del conducente. Ottenere un diagramma di trazione programmato ad hoc non risulta possibile in quanto molto dipende dallo stile di guida del pilota. Tuttavia la tendenza attuale è quella di addestrare il personale ad una condotta di guida basata meno su brusche accelerazioni e decelerazioni, ma più sull'utilizzo del *coasting* mediante l'ausilio di dispositivi di assistenza alla guida che suggeriscono al conducente un'adeguata velocità di marcia.

La stesura di questa tesi è avvenuta con la preziosa disponibilità dell'Ing. Federica Danise dello studio Geodata Engineering S.p.a., azienda impegnata nella fornitura di servizi di geoingegneria e lavori sotterranei, con conoscenza ed esperienza internazionalmente riconosciuta ed applicate a qualunque progetto in ogni parte del mondo. Relativamente allo sviluppo del lavoro di tesi l'azienda in questione, durante la collaborazione, forniva i dati relativi al caso studio in esame come il tracciato plano-altimetrico della linea oggetto di ricerca e del materiale rotabile. Durante i vari incontri studio perfezionavo l'utilizzo del software OpenTrack attraverso l'utilizzo dei processi di simulazione necessari allo sviluppo

del presente lavoro. Lo scopo di questo elaborato consiste nell'applicazione dei servizi di impiego di tale tipologia di trasporto collettivo su una linea in costruzione nella città di Istanbul. A tal proposito si verificherà la fattibilità di progettazione e l'identificazione dei parametri prestazionali principali in differenti condizioni di esercizio, analizzando i tempi di corsa per coprire la distanza dell'intera linea, i consumi energetici e la gestione di eventuali guasti al materiale rotabile, attraverso processi di simulazione effettuati con l'ausilio del software OpenTrack. Il punto centrale ed innovativo sviluppato in questo elaborato consiste nel ricercare ed ottenere la condizione di *coasting* ottimale in grado di garantire minori consumi energetici e massime prestazioni in termini di livello di servizio offerto.

Il secondo capitolo è dedicato inizialmente alla definizione di metropolitana con particolare attenzione sulla sua evoluzione nel tempo in Europa e nel mondo, sulla classificazione di tale mezzo, sui sistemi di segnalamento e sul livello di automazione. Tra i sistemi di trasporto innovativi lo studio verte sulla metropolitana *driverless*, punto centrale della presente ricerca, ed a tal fine viene dedicato un paragrafo ove, tramite un'accentuata revisione degli studi inerenti all'argomento, sono evidenziati i benefici e le potenzialità di codesto sistema di trasporto. Successivamente particolare attenzione è rivolta alle fasi del moto, con l'intento di ridurre al minimo la durata del tempo di viaggio senza trascurare la sicurezza del trasporto stesso. Il terzo capitolo è rivolto interamente alla presentazione ed allo sviluppo del caso oggetto di studio, verificando ed applicando tale tipologia di trasporto per il suo impiego presso la linea *Hastane-Soyak* della città di Istanbul ed, al fine di una raccolta precisa dei dati, all'interno dello stesso capitolo viene presentata un'attenta analisi relativa alla fase di *coasting* (guida ottimizzata). Sulla linea in esame, attraverso un processo di simulazione elettrica, sono esposti i risultati sui consumi energetici. Nel quarto capitolo sono presentati i risultati ottenuti dai vari processi di simulazione sulla metropolitana *driverless Hastane-Soyak* tramite software OpenTrack, valutando i consumi energetici, le prestazioni ed i consumi in "Normal conditions" ed in "Eco-Mode conditions", al fine di individuare la condizione di *coasting* ottimale; infine un paragrafo risulta essere dedicato alle valutazioni sugli effetti di possibili guasti al materiale rotabile. Nel quinto ed ultimo capitolo sono esposte le conclusioni soffermandosi sugli esiti pervenuti dalle simulazioni in OpenTrack mettendo in risalto i benefici economici ed ambientali risultanti dall'applicazione di tale sistema sulla linea *Hastane-Soyak*.

2. Trasporto ferroviario ad uso metropolitano

2.1. Generalità sul trasporto ferroviario ad uso metropolitano

La norma UNI 8379 [1] definisce la metropolitana come “un sistema di trasporto rapido di massa, di alta capacità e frequenza, costituito da veicoli automotori o mossi da veicoli automotori circolanti su rotaia, oppure con altra guida vincolante e completamente svincolata da qualsiasi altro tipo di traffico, con regime di circolazione regolata da segnali”. Il trasporto metropolitano risulta essere una componente primaria per la formazione della modernità e progresso, e contribuisce in maniera preponderante alla prosperità sociale ed economica di una città, favorendone la mobilità di un numero cospicuo di persone verso i centri urbani e le loro periferie interne.

Le linee metropolitane, nella maggior parte dei casi, non sono vincolate tra loro, ma assumono carattere diametrale, favorendo la connessione di punti opposti all'interno di un contesto urbano nel più breve tempo possibile.

I tracciati sono progettati in modo da formare nelle zone centrali e semiperiferiche, maglie più o meno fitte, adottando di frequente, biforcazioni che permettono di espandere la zona di influenza nelle parti più esterne delle aree urbane.

Il volume dei passeggeri trasportato da una metropolitana è molto elevato rispetto ad altri sistemi di trasporto, (sia una metropolitana classica, leggera, o a guida completamente automatica), e ciò permette di identificare questa categoria di trasporto, come l'asse portante del sistema di mobilità all'interno delle grandi città mondiali.

Modo di trasporto	Potenzialità [pass/h per direzione]
Autobus e filobus (semplici o articolati)	~500-1000
Tram in sede promiscua	~2000-3000
Tram in sede riservata (in modo prevalente o metropolitane leggere)	~2000-4500
Sistemi a guida automatica di derivazione funiviaria ed altri sistemi innovativi	~4000-10000
Sistemi a guida automatica di derivazione metropolitana	~8000-25000
Metropolitane classiche	~20000-45000

Figura 1: Potenzialità di diversi sistemi di trasporto

2.1.1. Origini e progresso del trasporto metropolitano

La metropolitana è un sistema di trasporto rapido di massa di tipo ferroviario destinato ai servizi urbani, caratterizzato da una elevata frequenza delle corse, e normalmente organizzato sulla base di percorsi fissi. Tale sistema di trasporto rappresenta sicuramente il principale mezzo di trasporto pubblico su rotaia, oltre ai tram ed ai treni, utilizzato in tutto il mondo.

Lo scatto verso l'innovazione fissa le sue radici nell'esigenza di decongestionare volumi di traffico sempre più in aumento a causa dell'espansione dei mercati su aree sempre più vaste, a cui segue logicamente un aumento delle distanze da percorrere nel minor tempo possibile.

I primi interventi urbani sul fronte dei trasporti risalgono agli inizi del XIX secolo, in particolar modo, in tutte quelle città in fase di trasformazione da aree urbane a metropoli, in cui sorsero servizi regolari di trasporto pubblico [2].

In data 10/01/1863 venne inaugurata a Londra la “*Metropolitan Railway*”, nata dall'esigenza di coadiuvare molti dei capolinea delle stazioni ferroviarie i quali erano dislocati a diversi km di distanza dal centro cittadino. I primi treni ad operare su tale linea furono dei treni a vapore i quali, nonostante la creazione di numerose prese d'aria all'interno delle gallerie, risultarono essere non idonei soprattutto in materia di comfort e sicurezza, sia per i passeggeri che per il personale operativo.



Figura 2: *London Underground of 1872*

L'esigenza di spingersi verso nuove forme di alimentazione, portò nel 1890 all'inaugurazione della prima ferrovia urbana sotterranea elettrificata, la “*City and South London Railway*”.

Un notevole passo in avanti nel trasporto urbano di massa guidato elettricamente, si ebbe nel 1897, quando Frank J. Sprague testò con successo il suo sistema di controllo del treno a più unità “MUTC”, sulla *South Side Elevated Rail Road* (Chicago). Il test consisteva nel controllare tutti i motori del treno da un unico punto.

In Europa un ulteriore slancio verso l’innovazione fu rappresentata nel 1896 dalla linea M1 di Budapest, prima linea sotterranea con cavi aerei. Tale linea dopo aver subito nel corso del XX secolo un cospicuo restauro, risulta tutt’ora operante all’interno del capoluogo ungherese.

Tra la fine del XIX secolo e gli inizi del XX secolo, numerose città in tutto il mondo adottarono questa nuova tipologia di trasporto rapido di massa. Tra queste necessitano di essere menzionate: la metropolitana di New York, (che divenne una delle più grandi al mondo ed aprì la sua prima sezione nel 1904, una linea a 4 binari completamente indipendenti che si estendeva per 14 km), la metro di Parigi 1900, la metropolitana di Tokyo 1927, la metropolitana di Osaka 1933.

A partire dagli anni ‘60 vennero realizzati i primi sistemi monorotaia basati sul principio Wuppertal (monorotaia sospesa), infatti fu costruito il sistema Alweg, il quale permetteva ai treni di viaggiare su una trave in cemento armato, i quali oltrepassavano parzialmente la sede dei binari.

In questo modo le gomme pneumatiche del treno, rotolano su tre lati della sede dei binari: ruote portanti sul lato superiore, ruote conduttrici (o direzionali) sui due lati.

Tale tipologia di sistema ha trovato largo impiego nel continente asiatico, soprattutto nelle città di Tokyo, Osaka, Singapore, Kuala-Lumpur, ed anche nelle fiere e nei parchi divertimento come Disneyland in Florida.



Figura 3: Monorotaia con sistema Alweg presso Disneyland Florida

Una pregevole novità fu introdotta a cavallo degli anni '70 ed '80 con l'avvento dei Maglev, consistenti in “impianti a sostentamento magnetico, in cui la compensazione quasi completa del veicolo veniva realizzata mediante attrazione o repulsione ottenuta da elettromagneti o magneti permanenti” [2]. L'utilizzo di tale sistema all'interno di un contesto urbano, risulta di difficile impiego in quanto esso presenta scarsa flessibilità in termini di realizzazione di stazioni *off-line*, e ciò lo rende molto più rigido rispetto ad un comune sistema ferroviario.

Infine a partire dagli anni '80 si assistette a una nuova generazione di sistemi di trasporto innovativi, vale a dire metropolitane completamente automatiche, dotati di sistema VAL, (*Vehicule Automatique Léger*) prodotto dalla società Matra in seguito assorbita dalla Siemens, TGA (*Transport Guideway automated*) prodotto dalla Kawasaki, ALRT (*Advanced Light Rail Transit*) prodotto dalla UTDC (*Urban Transportation Development Corporation Limited*) assorbita in seguito da Bombardier e infine AGS (*Automated Guideway System*) prodotto dalla *Westinghouse Electric Corporation*. L'uso tradizionale col conducente non permetteva un'alta frequenza e i costi erano nettamente superiori, per questo motivo furono scelti i veicoli automatizzati che, tramite binari e stazioni apposite, permettevano il loro funzionamento abbattendo i costi superflui, incrementando la potenzialità oraria e migliorando notevolmente il comfort e la sicurezza.



AGS



ALRT



TGA



VAL

Figura 4: Principali sistemi di metropolitane a guida automatica

2.1.2. Classificazione dei sistemi di trasporto collettivo ad impianto fisso

Per sistema di trasporto collettivo, si intende una tipologia di trasporto ad accesso pubblico a fronte del pagamento di un titolo di viaggio, con percorsi ed orari prestabiliti, in grado di muovere una ingente quantità di utenti [2].

Ai cosiddetti sistemi “ad impianto fisso” appartengono varie categorie di sistemi di trasporto tra cui: le ferrovie, le metropolitane classiche, leggere o ad automazione integrale, gli impianti a fune, e anche quelle categorie di trasporto di carattere più innovativo (es. *people mover urbani*).

All'interno della letteratura di settore, difficilmente sono reperibili vaste classificazioni inerenti i sistemi di trasporto collettivo, frequentemente sono più definite delle macro-classi generali o differenti categorie tecnologiche, su cui è possibile implementare una classificazione.

Una prima classificazione è quella elaborata da Vuchic [4], all'interno della quale vengono individuate 4 tipologie di sistemi di trasporto collettivo:

- sistemi di trasporto collettivo urbano
- sistemi di trasporto collettivo semi-rapidi
- sistemi di trasporto collettivo rapidi
- sistemi di trasporto collettivo speciali

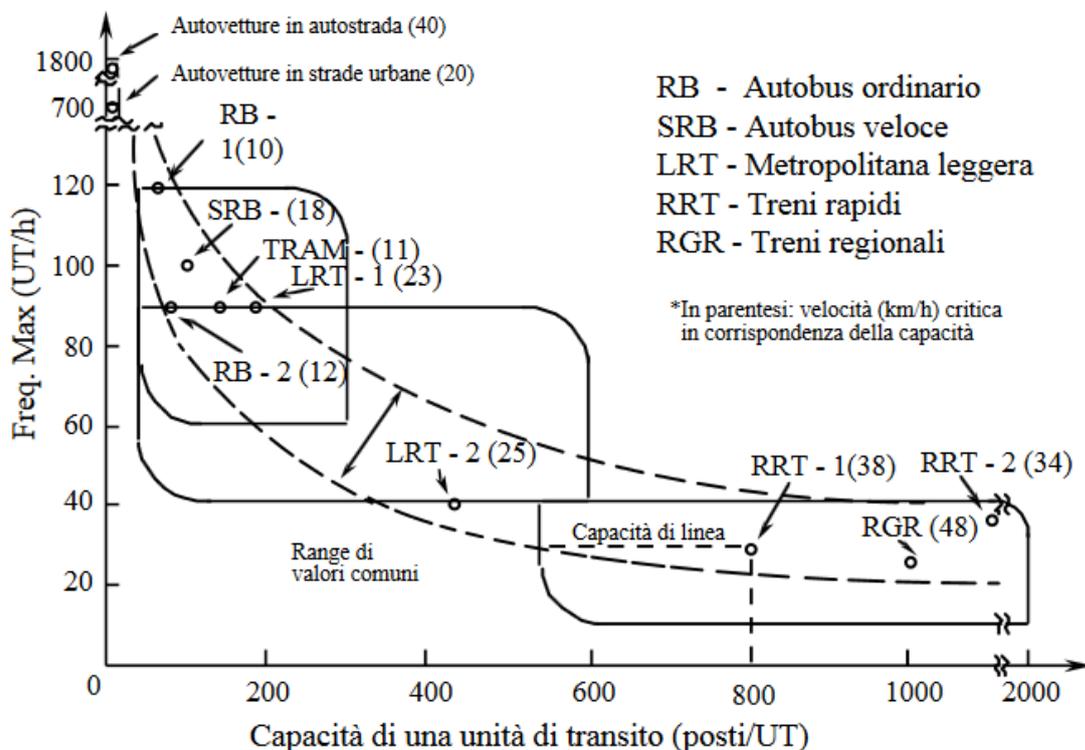
La nostra attenzione si focalizzerà sulle ultime due tipologie di sistema di trasporto collettivo, ovvero su quelli rapidi e speciali. I sistemi di trasporto collettivo rapidi (*Rapid transit*), vengono definiti come un sistema ferroviario, solitamente elettrico, che viene utilizzato per il trasporto locale in un'area metropolitana. Tale linea può essere interrata (metropolitana), al di sopra del livello stradale (linea di transito sopraelevata) o al livello della strada. Questa categoria di trasporto pubblico locale si distingue dalle altre forme di trasporto di massa per la sua operatività sul diritto esclusivo, senza accesso per altri veicoli o per i pedoni, ed offre un servizio più rapido rispetto agli altri sistemi utilizzabili, tipicamente con velocità media operativa di 50 km/h o superiore [3]. Appartengono a questa categoria le metropolitane classiche, metropolitane leggere, le monorotaie ed i servizi metropolitani extraurbani e regionali.

Alla classe dei sistemi di trasporto collettivo speciali (*Special Transit*) appartengono invece gran parte dei sistemi a guida automatica (AGT), i sistemi a guida automatica con trazione a fune ed i sistemi a nastro o tappeti mobili.

Un'ulteriore classificazione per i sistemi di trasporto collettivo può essere svolta prendendo in considerazione le seguenti caratteristiche:

- tipo di sede viaria (promiscua, protetta, riservata)
- tecnologia (supporto, guida vincolata o guida libera, propulsione, controllo)
- tipo di servizio (dimensioni del viaggio, durata)

Tali sistemi di classificazione risultano essere, come precedentemente esposto, solo una piccola parte delle metodologie di classificazione di tale tipologia di trasporto. Di seguito viene proposta una nuova classificazione elaborata da Vuchic [4], basata sui parametri tecnico-operativi per classi di sistemi di trasporto, quali: la capacità del veicolo, la frequenza massima, la capacità della linea, la velocità commerciale e la capacità produttiva.



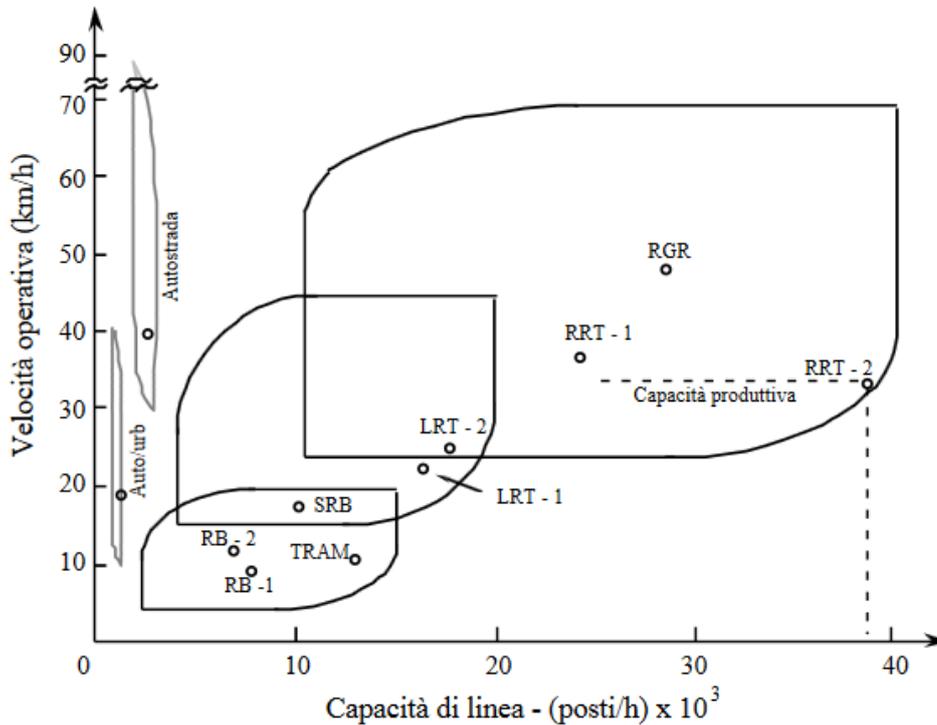


Figura 5: Parametri tecnico-operativi per classi di trasporto proposti da Vuchic [4]

Nel primo grafico viene messa in relazione la frequenza del servizio con la capacità del veicolo, la quale decresce all'aumentare della frequenza; è possibile inoltre individuare la capacità della linea semplicemente moltiplicando la capacità del veicolo per la frequenza di servizio. Nel secondo grafico viene messo in risalto invece la capacità produttiva dei diversi mezzi di trasporto.

Infine è possibile effettuare un'ultima ma importantissima classificazione dei sistemi di trasporto collettivo, in due grandi categorie, in funzione della collocazione del motore.

All'interno di questa macro classificazione è possibile operarne un'altra in relazione al tipo di guida:

- sistemi con motore di trazione a bordo del veicolo:
 - guida libera
 - guida semi-vincolata
 - guida vincolata
- sistemi con motore di trazione in sede fissa:
 - sistemi di trasporto a fune
 - sistemi di trasporto con infrastrutture mobili

I veicoli con motore di trazione a bordo sono quei veicoli che presentano un sistema di propulsione a bordo del mezzo, che invia la forza motrice prodotta direttamente agli organi di trasmissione del moto e di conseguenza a quelli di rotolamento. I veicoli con motore di trazione a bordo a guida vincolata sono in grado di garantire elevate prestazioni di servizio, ma i costi di investimento risultano essere abbastanza elevati e si hanno maggiori vincoli di percorso per i veicoli sul territorio [2].

A questa categoria appartengono i seguenti veicoli:

- tram (Tram ordinario, Tram-bus con rotaia, Tram-treno)
- metropolitana (classica, leggera, a guida completamente automatica)
- ferrovia (tradizionale, locale, metropolitana)
- monorotaia (veicoli appoggiati, veicoli sospesi, veicoli laterali)

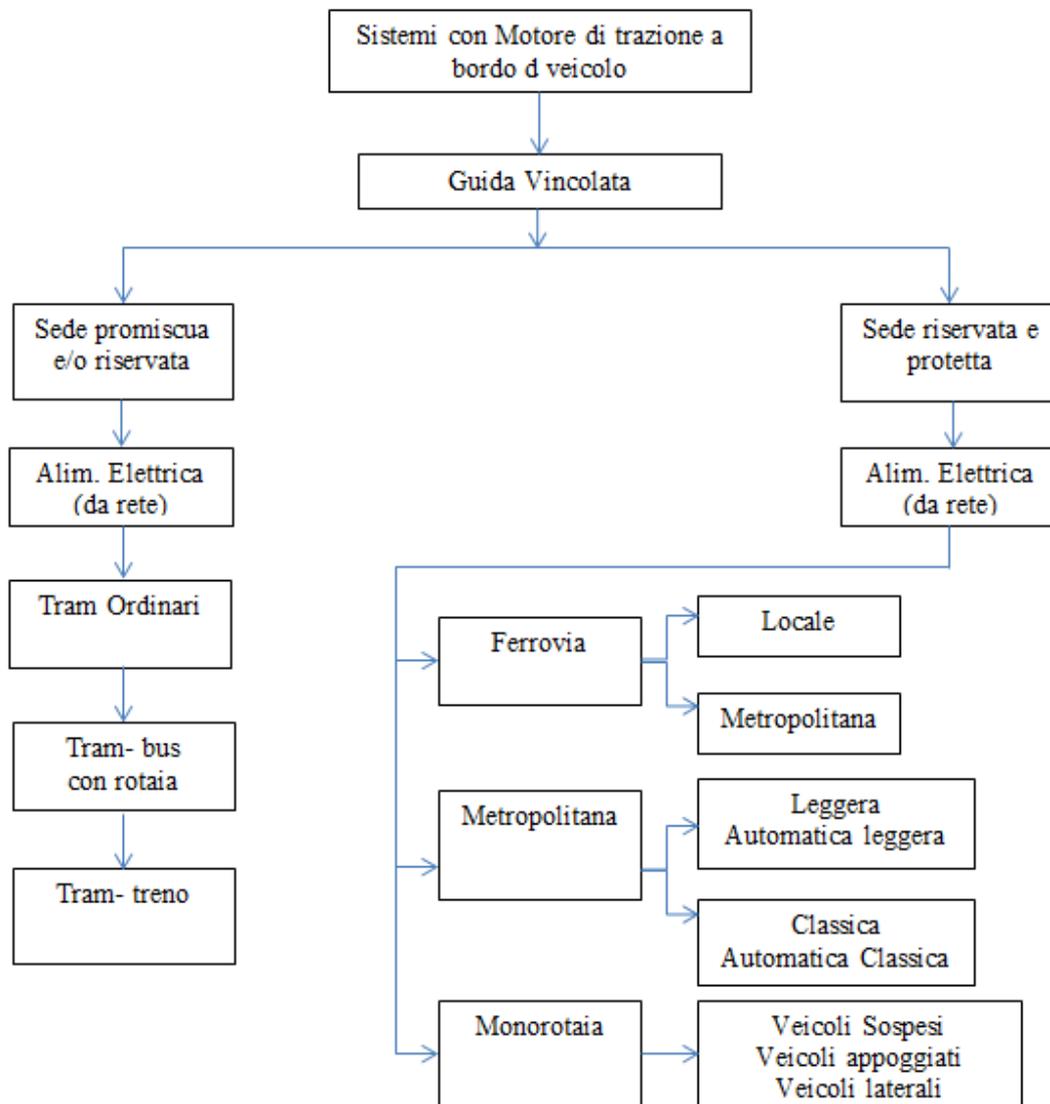


Figura 6: Classificazione sistemi di trasporto collettivo con motore di trazione a bordo a guida vincolata

2.1.3. Sistemi di trasporto innovativi: la metropolitana *driverless*

Alla tipologia di sistemi di trasporto “innovativo”, appartengono tutte quelle tipologie di trasporto “non convenzionali” dotate di spiccati elementi di innovazione che riguardano tutte le componenti principali di un sistema di trasporto, vale a dire il veicolo, l’infrastruttura viaria, l’impianto di segnalamento, la circolazione ferroviaria, il rapporto via-veicolo, ecc. Attualmente, il problema della congestione dei centri urbani dovuto all’aumento della circolazione automobilistica, la necessità da parte degli utenti di attraversare diametralmente la città nel minor tempo possibile, l’aumento della qualità della vita, l’evoluzione tecnologica ha portato ad un nuovo modo di concepire la mobilità urbana.

Focalizzando l’attenzione sul sistema di trasporto metropolitano, la costruzione di una metropolitana classica nel corso degli ultimi decenni ha lasciato spazio a nuovi sistemi di trasporto “innovativi” quali le cosiddette “metropolitane *driverless*” (metropolitana a trazione automatica).

Tale tipologia di trasporto innovativo come riporta la UITP (*International Association of Public Transport*) [5], è contraddistinta da una serie di livelli di automazione dei treni (GoA “*Grades of automation*”), in grado di sostituire in parte o del tutto l’operato del personale di bordo. Il più recente livello di automazione, quello a cui rispondono oggi i più evoluti sistemi di trasporto metropolitano ad automazione integrata è il livello “GoA 4” (*Grade of automation 4*), al quale fa capo il cosiddetto sistema “UTO” (*Unattended Train Operator*), sistema di controllo che non prevede la presenza a bordo del conducente durante le operazioni di marcia del treno, arrivo-partenza, circolazione, apertura e chiusura delle porte in prossimità delle stazioni. Un così complesso livello di automazione necessita di uno scambio continuo di informazioni tra terra/treno e posto centrale, e questo è garantito dal sistema, CBTC (*Communication – Base – Train – Control*), che racchiude al proprio interno una complessa architettura di sistemi di sicurezza quali:

- ATP (*Automatic Train Protection*) il quale ha come obiettivo principale quello di controllare la velocità del treno in conformità ai criteri sicurezza, arrestando quest’ultimo nel caso in cui dovessero essere oltrepassate le velocità massime consentite in funzione delle condizioni di circolazione e delle caratteristiche del tracciato;

- ATO (*Automatic Train Operation*), tale sistema di controllo è in grado di regolare la velocità del treno e mantenerla prefissata entro certi limiti stabiliti dall'ATP, intervenendo mediante operazioni di accelerazione e frenatura; un'ulteriore funzione operata dall' ATO (in caso di assenza a bordo treno del macchinista, gestita insieme ATP) consiste nel controllare le operazioni di apertura e chiusura porte in totale sicurezza;
- ATS (*Automatic Train Supervision*) la cui principale funzione consiste nella regolazione automatica della circolazione dei treni in relazione all'orario da rispettare.

Il controllo e la direzione di un così particolare e sofisticato sistema viene gestito in una sede esterna, il cosiddetto "Posto Centrale di Controllo" (PCC), ovvero la centrale di comando in cui confluiscono tutte le informazioni di manutenzione ed esercizio.

Il continuo progredire e sviluppo tecnologico dei vari livelli di automazione, ultimo tra tutti il sistema "UTO" (*Unattended Train Operator*), nel corso degli anni ha portato le grandi città mondiali (Pechino, Shanghai, Dubai, Istanbul, Singapore, Toronto, Santiago de Chile, Torino, Milano) ad investire su questa tipologia di trasporto innovativo. Nel 2018 sono stati raggiunti e superati i 1000km di linee ad automazione integrale, e a breve nel 2025 raggiungeranno i 2300km [7]. Tale scelta è stata avvalorata da una quantità ingente di vantaggi che le metropolitane automatiche presentano e che risultano essere benefiche nei confronti non solo degli utenti, ma anche degli operatori del personale e delle autorità ecc.

La sicurezza, la qualità del servizio, la maggior flessibilità operativa, i minori costi di gestione dovuti alla mancanza del personale di bordo, l'ottimizzazione dei consumi energetici, la possibilità di gestire l'entrata/uscita dei treni in modo da regolare il servizio nell'ora di punta, minori tempi di cantierizzazione delle opere civili all'interno di contesti urbani, il comfort offerto dal trasporto su gomma e l'ottimizzazione della capacità della linea risultano essere alcuni dei punti di forza che contraddistinguono "metropolitane *driverless*" dalla "metropolitana classica".

Numerosi inoltre risultano essere gli interventi di conversione da linee cosiddette "convenzionali" a linee ad automazione integrale come ad esempio la linea L1 di Parigi (2011), e la U-Bahn Line2 di Norimberga (2010).

Effettuare un intervento del genere comporta costi cospicui, dovuti principalmente alle modifiche che vengono introdotte all'interno del sistema di segnalazione e controllo, aggiornamento e sostituzione del materiale rotabile (treni, sede viaria, ecc.), difficoltà inerenti all'installazione di dispositivi di protezione all'interno di stazioni convenzionali (*screen doors*

isolamento sede viaria). Come citato dall'UITP [5], “i progetti di conversione dovrebbero essere programmati a fine del ciclo di vita in modo da minimizzare i costi”, e si stima che “il tempo di ritorno sul periodo di investimento è di circa 10 anni”. Ultimo, ma non in termini di importanza, risulta essere la riqualificazione del personale esistente verso nuove mansioni, tra cui quella di assistenza clienti a bordo dei treni o all'interno delle stazioni. Scompaiono i cosiddetti “lavori di routine”, dato che gli ultimi livelli di automazione dotati di sistemi “UTO” e “DTO” non prevedono la presenza a bordo del conducente, e tutto ciò porta ad un aumento della sicurezza ed a minori costi di esercizio.

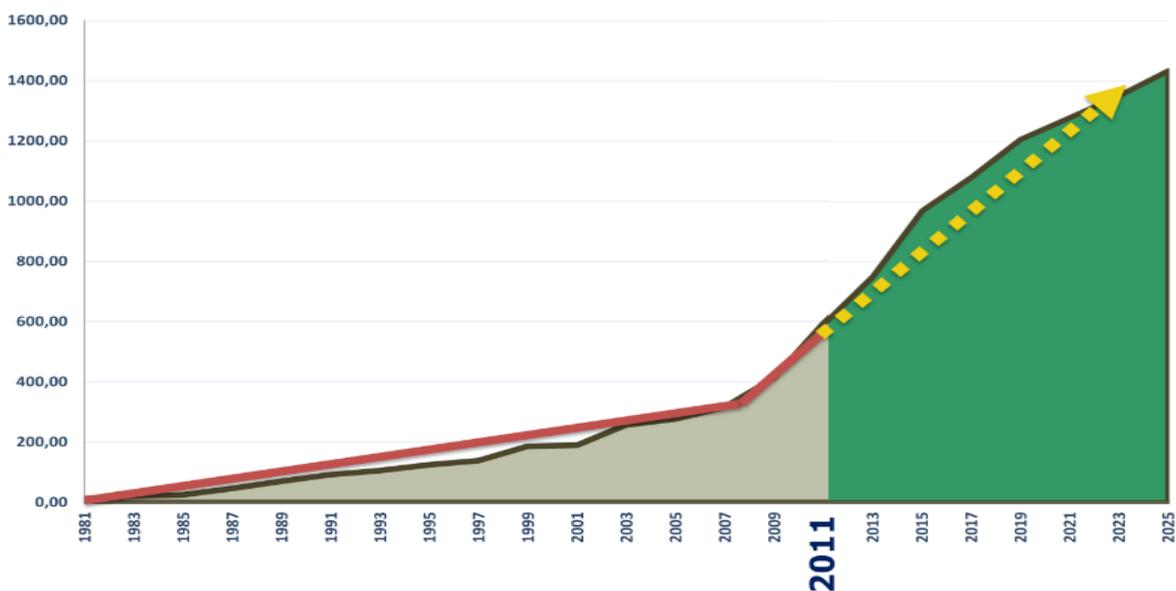


Figura 7: Trend evolutivo km linee metropolitane automatiche[5]

2.1.4. Stato dell'arte

Da una lunga e accurata revisione della letteratura di settore, è stato possibile constatare l'interesse manifestato da numerosi autori su questa particolare tipologia di trasporto metropolitano. Soprattutto nell'ultimo ventennio, sono stati effettuati numerosi studi di settore che hanno dimostrato i benefici, potenzialità e vantaggi che la metropolitana *driverless* offre rispetto ad una metropolitana convenzionale (classica) in termini di sicurezza, efficienza energetica, qualità del servizio e prestazioni.

La metropolitana *driverless* sicuramente apporta numerosi vantaggi a tutti gli utenti del sistema, quali: passeggeri, operatori ferroviari, finanziatori e personale. I vantaggi chiave si possono riassumere in un'ottimizzazione del tempo di marcia, aumento della velocità media del sistema, riduzione del tempo di sosta nelle stazioni, che nel complesso si traducono in un'aumentata capacità della rete, puntualità ed efficienza energetica. Proprio quest'ultima risulta essere recentemente l'obiettivo principale di molte amministrazioni ferroviarie. A tal proposito all'interno della letteratura di settore è stato possibile rinvenire vari studi aventi come oggetto principale la riduzione dei consumi energetici, al fine di ridurre i costi di esercizio e indirettamente l'emissione di anidride carbonica. Il risparmio energetico, all'interno di un sistema di trasporto ferroviario urbano, dipende da una moltitudine di fattori, quali la morfologia del tracciato (pendenza, limiti di velocità, ecc.), caratteristiche del convoglio (peso, efficienza dei componenti, accelerazione e decelerazione, ecc.), sistema di segnalamento adoperato (blocco fisso, blocco mobile), livello di automazione (GoA) e da alcuni vincoli operativi come la durata del viaggio. Generalmente le tecniche utilizzate per tale tipo di studio sono modelli di elaborazione matematica e modelli basati sulla simulazione. I modelli matematici sono costituiti principalmente da tre tecniche di ottimizzazione: *programmazione non lineare* basata su un sistema di vincoli risolto attraverso una funzione oggettiva non lineare (energia consumata dal treno) la quale può essere minimizzata o massimizzata, *fuzzy logic* in cui la risoluzione dei problemi avviene mediante un ragionamento approssimativo (parzialmente vero o falso) ed infine vi è *l'algoritmo genetico* in cui la risoluzione dei problemi di ottimizzazione avviene utilizzando delle tecniche basate sull'evoluzione naturale, come selezione, ereditarietà e crossover. L'algoritmo genetico è la tecnica in grado di fornire i migliori risultati (riduzioni energetica dell'ordine del 40%), ma in genere, non essendo gli algoritmi genetici deterministici, il livello prestazionale trovato non sempre risulta essere lo stesso e di conseguenza una loro applicazione ai casi reali risulta di difficile impiego. D'altro canto i modelli basati sulla simulazione (tecnica adottata in questo lavoro di tesi al fine di ricercare la condizione ottimale in grado di minimizzare i consumi e massimizzare le prestazioni) risultano essere molto più flessibili, non richiedono importanti semplificazioni ed i risultati trovati sono molto più precisi ed accurati.

Di seguito in formato tabellare vengono riportati alcuni studi di settore, incentrati sulle principali caratteristiche e componenti tecniche che contraddistinguono una metropolitana ad automazione integrale.

“Application of Genetic Algorithms for Driverless Subway Train Energy Optimization [8]”						
Rivista Anno - Autori Tipo di studio	Obbiettivi	Oggetto di studio	Intervento	Confronto	Risultati	Osservazioni
<i>-International Journal of Vehicular Technology, 2006 -Morris Brenna, Federica Foadelli, Michela Longo -Studio Stocastico</i>	<i>Ottimizzazione dei consumi energetici tramite applicazione di un algoritmo genetico</i>	<i>Linea metropolitana driverless di Milano</i>	<i>Valutazione del risparmio energetico tramite simulazione della corsa dei treni in differenti condizioni di circolazione</i>	<i>1) Energia consumata in “Normal conditions” 2)Energia consumata in “Eco-Mode conditions”</i>	<i>Dal confronto si ottiene un risparmio energetico sull’intera percorrenza della linea in “Eco-Mode conditions”, del 32.89% a fronte di un incremento del tempo di percorrenza dello 10.56%, con un risparmio di 195.8 Kwh per viaggio.</i>	<i>I risultati ottenuti sono stati ottimizzati mediante l’uso di un algoritmo genetico</i>

Tabella 1: “Application of Genetic Algorithms for Driverless Subway Train Energy Optimization [8]”.

“Potential Benefits and Obstacles of Implementing Driverless Train Operation on the Tyne and Wear Metro: A Simulation Exercise [9]”

Rivista Anno - Autori Tipo di studio	Obbiettivi	Oggetto di studio	Intervento	Confronto	Risultati	Osservazioni
<p><i>-Urban Rail Transit (2016) 2(3-4):114-127</i> <i>-Jonathan Peter Powell, Anna Fraszczyk, Chun Nok Cheong, Ho Ki Yeung</i> <i>-Metodo Sperimentale</i></p>	<p><i>Analisi accurata dei vantaggi e degli ostacoli che comporta la conversione di una linea metropolitana convenzionale</i></p>	<p><i>The Tyne and Wear Metro, Newcastle</i></p>	<p><i>Simulazione di esercizio di una linea metropolitana caratterizzata da diversi livelli di automazione</i></p>	<p><i>1) "Existing Rolling stock and signaling-system" (Manual driving – ATO low adhesion - ATO) .</i> <i>2)) "Hight performances Rolling stock and signaling-system" (Manual driving– ATO low adhesion - ATO)</i></p>	<p><i>1) Incremento capacità da 20-22 tph (Manual driving-ATO)</i> <i>2)Incremento capacita da 22-23-30 tph (Manual driving-ATO low-adhesion-ATO) .</i> <i>1)Tempo di percorrenza-Energia consumata -7% +8% ATO</i> <i>2) Tempo di percorrenza-Energia consumata -2% +1% Manual driving, -8% +12% ATO</i></p>	<p><i>I dati relativi ai consumi e alla capacità variano a seconda del tipo di guida,coasting,etc. L'impiego di "Hight performances Rolling stock and signaling-system" comporta costi elevati, ma garantisce un servizio più performante.</i></p>

Tabella 2: “Potential Benefits and Obstacles of Implementing Driverless Train Operation on the Tyne and Wear Metro: A Simulation Exercise [9]”

<p style="text-align: center;">“Increasing of Subway Lines Capability through Moving Block Signaling Systems: Modeling and Simulation [10]”</p>						
Rivista Anno - Autori Tipo di studio	Obbiettivi	Oggetto di studio	Intervento	Confronto	Risultati	Osservazioni
<p><i>-AEIT International Annual Conference (AEIT), 2016. IEEE.(pp. 1-6). -Brenna, M., Foiadelli, F., Longo, M., Zaninelli, D., Bellini, P., & Sicurello, M.</i></p>	<p><i>Aumento della capacità di una linea metropolitana., tramite conseguimento di un Headway minimo pari a 120 secondi</i></p>	<p><i>Linea metropolitana</i></p>	<p><i>Simulazione della corsa dei treni in presenza di diversi sistemi di segnalamento</i></p>	<p><i>1) Sistema a blocco fisso 2)Parziale rinnovamento di un Sistema a blocco fisso con riduzione delle sezioni di blocco 2) Sistema a blocco mobile</i></p>	<p><i>1) Headway 195 (s) Capacity Line 18 (tph) 2)Headway 120 (s) Capacity Line 29 (tph) 3)Headway 70 (s) Capacity Line 51 (tph)</i></p>	<p><i>Nei sistemi con blocco fisso il perseguimento di un headway pari a 120 s è il massimo che si può ottenere solo dopo un intervento di rinnovamento. I risultati ottenuti con il blocco mobile sono impossibili da ottenere con un sistema di segnalamento a blocco fisso.</i></p>

Tabella 3: “Increasing of Subway Lines Capability through Moving Block Signaling Systems: Modeling and Simulation [10]”

“Coordinated train control in a fully automatic operation system for reducing energy consumption[11]”

Rivista Anno - Autori Tipo di studio	Obbiettivi	Oggetto di studio	Intervento	Confronto	Risultati	Osservazioni
<p><i>-Computers in railways XIII: computer system design and operation in the railway and other transit systems</i> 127 (2013): 3. -Xun, J., Yang, X., Ning, B., Tang, T., & Wang, W. -studio analitico</p>	<p><i>Ottimizzazione dei consumi tramite l'utilizzo di energia rigenerata e analisi del loro impatto sull'headway e sul tempo di attesa dei passeggeri</i></p>	<p><i>Beijing Metro, Yizhuang Line</i></p>	<p><i>Analisi dell'applicazione di diversi livelli di recupero energetico, mediante processo di simulazione della corsa dei treni.</i></p>	<p>1) <i>Energy efficient-driving</i> 2) <i>Real-time multi-train coordination and rescheduling</i></p>	<p>1) <i>Utilizzo medio energia rigenerata 3.4Kwh per treno</i> 2) <i>Utilizzo medio energia rigenerata 39.5 Kwh per treno</i> 1) <i>Headway 120s</i> <i>Tempo di attesa dei passeggeri 60 s</i> 2) <i>Headway 120s</i> <i>Tempo di attesa dei passeggeri 60-80 s</i></p>	<p><i>L'utilizzo del metodo 2 consente di intervenire in tempo reale sulle operazioni di frenata e accelerazione con una costante variazione del tempo di marcia del treno, e allo stesso tempo garantisce un migliore riutilizzo dell'energia rigenerata con conseguente ottimizzazione dei consumi.</i></p>

Tabella 4: “Coordinated train control in a fully automatic operation system for reducing energy consumption[11]”

Sulla base dei risultati esposti precedentemente e dopo una precisa revisione di molti articoli presenti all'interno della letteratura di settore, le conclusioni che si possono estrapolare sono numerose. La maggior parte dei casi analizzati sottolineano i benefici e le potenzialità che derivano dall'utilizzo di questo innovativo sistema di trasporto, che le differenziano dalle metropolitane "classiche". Un fattore che merita particolare attenzione consta essere l'ottimizzazione dei consumi energetici. Come emerso dai risultati sugli studi di settore analizzati infatti giocano un ruolo importante, sia la componente relativa alla guida ottimizzata (*coasting*) che l'uso della frenata a recupero di energia. Risulta possibile recuperare parte dell'energia cinetica persa in frenata la quale viene re-introdotta all'interno del sistema e può essere utilizzata nuovamente per garantire la trazione dei veicoli che seguono. Il continuo alternarsi della fase di frenatura e di accelerazione comporta un cospicuo recupero energetico, il quale risulta essere incrementato maggiormente qualora il numero di treni presenti sulla linea fosse elevato. Dallo studio condotto sulla metropolitana *driverless* di Milano [8] è possibile notare come il recupero energetico, individuato mediante l'applicazione di un algoritmo genetico in seguito all'adozione di una guida ottimizzata, risulta essere rilevante (circa 33%) a fronte di un incremento temporale di percorrenza della linea pari a circa il 10%. Nel caso in cui il calcolo del risparmio energetico fosse stato condotto con tecniche differenti (tecniche basate su modelli di simulazione), il risultato a cui è possibile pervenire (vedi caso studio in esame) risulterebbe essere di qualche ordine di grandezza inferiore (5-15%), ma un suo utilizzo, come precedentemente esposto, fornisce risultati molto più precisi ed accurati facilmente applicabili ai casi reali.

Se da un lato l'efficienza energetica rappresenta oggi il principale obiettivo da conseguire per le amministrazioni ferroviarie, sicuramente anche la sicurezza, l'elevata frequenza di passaggio, il rispetto del cadenzamento, il comfort del viaggiatore rappresentano i principali indici prestazionali relativi alla corsa di un convoglio di cui le amministrazioni ed i progettisti devono tener conto. Nel caso della metropolitana di Newcastle, come evidenziato dai risultati dello studio relativo alla conversione della linea The Tyne and Wear Metro, Newcastle [9], l'adozione di un sistema a guida automatica (GoA2-3-4), garantisce prestazioni performanti in termini di capacità della linea (30 tph-vs-22tph) congiunto all'utilizzo di un sistema di segnalamento e *rolling-stock* ad elevate prestazioni. Quest'ultima voce risulta essere di rilevante importanza, infatti gran parte dei vantaggi inerenti le metropolitane "*driverless*" sono dovuti all'utilizzo del blocco mobile, ovvero un particolare sistema, che tramite la segnalazione in tempo reale della posizione, velocità, distanza di frenatura ottimale dei treni, permette di ottenere un distanziamento minimo tra i veicoli, il che comporta un aumento della

frequenza di passaggio, un incremento della capacità della linea e di conseguenza un risparmio energetico rilevante in seguito alla vicinanza tra convogli successivi[10]. L'unico ostacolo rappresentato dall'utilizzo di questo sistema di segnalamento è legato al fattore economico, infatti l'adozione di un così sofisticato impianto di segnalamento legato al *re-styling* del materiale rotabile incide pesantemente sui costi. Nello specifico caso in esame, i benefici apportati dall'introduzione di tali dispositivi non sembrano essere necessari a giustificare un intervento economico così grande a causa della scarsa quantità di passeggeri trasportata [9], quindi la conversione in questo specifico caso non risulta essere la scelta più adeguata. Un'ultima considerazione da fare riguarda la sicurezza, infatti da uno studio condotto su 15 linee metropolitane di tutto il mondo [12], emerge che la conversione da una linea convenzionale, caratterizzata dalla presenza a bordo del macchinista, ad una linea ad automazione integrale, riduce il rischio di incidenti del 33%. A riguardo, l'amministratore delegato della metropolitana di Copenaghen Piero Marotta dichiara: *"il grande vantaggio di avere un sistema senza conducente è la sicurezza: l'elemento dell'errore umano viene eliminato completamente"* [6].

2.2. Locomozione ferroviaria

2.2.1. Meccanica della locomozione ferroviaria

La meccanica della locomozione studia il moto dei veicoli sotto l'azione delle forze cosiddette "attive", che corrispondono alle forze di trazione, e sotto l'azione delle forze "passive" ovvero le forze di resistenza che si oppongono. Affinché vengano soddisfatte le condizioni meccaniche per il moto devono essere verificate le condizioni di sicurezza e regolarità. Il veicolo, sottoposto all'azione di un sistema di forze (attive, passive, dipendenti dalla massa), sia nel moto rettilineo che in quello curvilineo deve essere in grado di mantenere un assetto equilibrato (sostentamento) e stabile (l'insieme delle forze applicate al veicolo e dei rispettivi momenti deve risultare uguale a 0), e affinché possa muoversi nella direzione voluta con la dovuta velocità deve disporre di un sistema di guida consono alle condizioni in cui opera. Una volta verificate e soddisfatte queste condizioni di equilibrio, il veicolo è in grado di muoversi nel modo richiesto, qualora disponga della potenza necessaria fornita dal motore e trasmessa dagli organi di trasmissione alle ruote motrici.

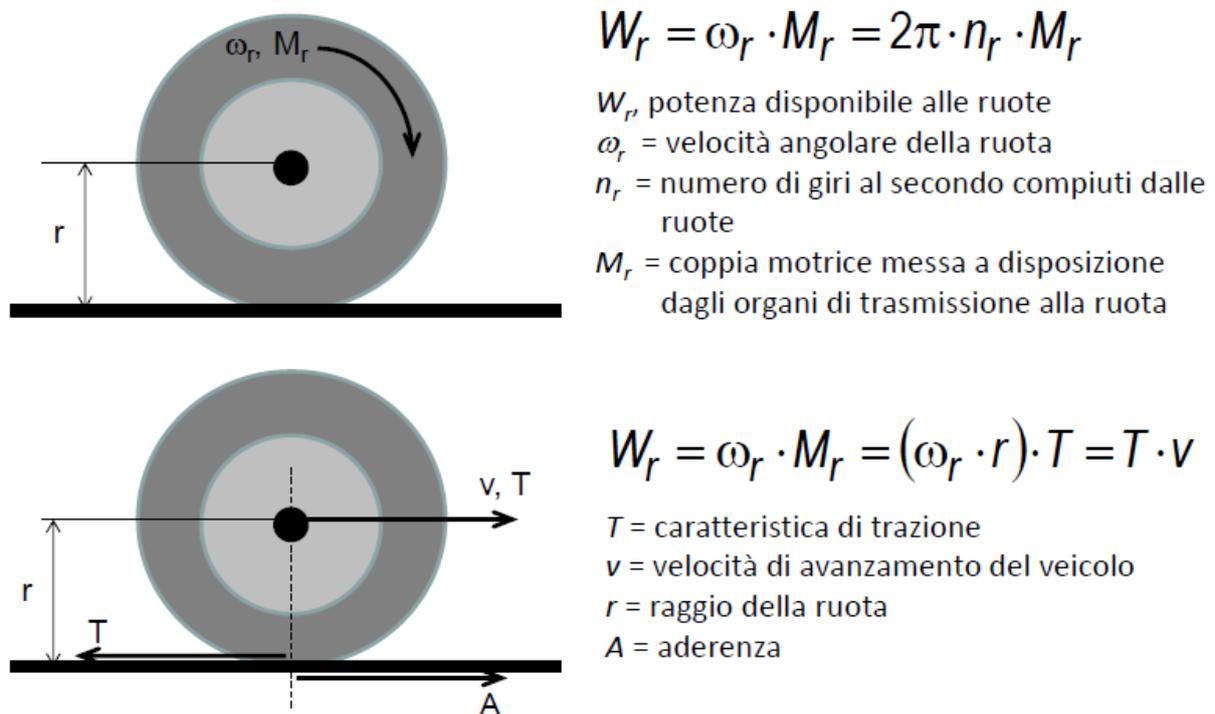


Figura 8: Ruota motrice, coppia motrice, trazione [20]

Equazione del moto

Sotto queste ipotesi l'equazione generale del moto relativa ai veicoli ferroviari risulta essere:

$$T = R + M \, dv/dt$$

- T somma di tutte le forze attive o di trazione (motrici o frenanti) applicate alle ruote del veicolo ferroviario tramite coppie motrici generate dal motore;
- R somma di tutte le forze passive o resistenze al moto applicate al veicolo ferroviario;
- $M \, dv/dt$ Forza di inerzia applicata nel baricentro del veicolo, di direzione coincidente con quella del vettore velocità e verso concorde o opposto a quello della velocità, a seconda che l'accelerazione dv/dt sia negativa o positiva.

Aderenza

L'area di contatto che si genera tra ruota-rotaia, risulta essere una superficie ellittica detta "ellisse di Hertz", ed è funzione del diametro della ruota e del peso che grava su di essa.

I cospicui carichi unitari trasferiti dalla ruota alla rotaia comportano una deformazione dei materiali che danno vita ad un vero e proprio ingranamento meccanico; inoltre l'attrito che si viene a creare tra questi due componenti fa sì che la superficie di contatto non rimanga sempre la stessa, ma varia continuamente entro certi limiti a seconda della posizione che la ruota assume sulla rotaia. La combinazione dell'adesione (legami di natura elettrochimica tra materiali), dell'attrito (scorrimento reciproco delle superfici) e della deformazione dei materiali, generano una forza chiamata aderenza, che per definizione risulta essere pari alla forza che viene scambiata nel punto di contatto della ruota, tra la stessa e la rotaia (ambito ferroviario). Tale grandezza viene rappresentata mediante la relazione generale:

$$A = P \, f_a$$

Dove con P viene indicato il peso gravante sulla ruota, mentre con f_a viene indicato il coefficiente di aderenza. L'aderenza inoltre presenta un limite superiore che una volta raggiunto comporta il bloccaggio della ruota con conseguente strisciamento di quest'ultima. Tale limite è espresso attraverso la relazione seguente:

$$A = P_a \, f_a$$

Dove P_a è il cosiddetto "Peso Aderente" vale a dire il peso che grava sugli assi motori.

Qualsiasi convoglio ferroviario, per avanzare ad una certa velocità V di regime, sia in fase di accelerazione che in fase di avviamento, deve superare le resistenze che si contrappongono al moto (resistenze ordinarie, resistenze accidentali, attriti, componenti del peso, ecc.).

L'interazione tra ruota-rotaia, può essere di puro rotolamento, di slittamento, o come nel caso della ruota frenata di pattinamento. Analizzando il caso della ruota motrice (Figura 8), è possibile individuare 3 condizioni:

- $\frac{M_r}{r} = T < R < P_a f_a$ Le ruote non procedono all'avanzamento e il veicolo rimane fermo. Per avere la massima aderenza, il P_a (Peso aderente) deve essere il più grande possibile in modo tale da sfruttare al meglio la coppia motrice ($C = M_r$), oppure si procede assumendo un valore elevato del coefficiente di aderenza f_a , il quale dipende dalle condizioni e dai materiali di contatto. I vincoli di riferimento sono il perno della ruota e il punto di contatto; se entrambi non cedono a causa della coppia motrice la ruota rimane ferma;
- $R < \frac{M_r}{r} = T \leq P_a f_a$ Moto di puro rotolamento, in cui si ha l'avanzamento del veicolo. All'aumentare del valore della coppia motrice ($C = M_r$), viene dapprima superato il vincolo relativo al perno della ruota, e dopo le ruote avanzano ruotando intorno al punto di istantanea rotazione che varia continuamente;
- $\frac{M_r}{r} = T = R > P_a f_a$ Condizione di slittamento della ruota. Con un ulteriore aumento del valore della coppia motrice ($C = M_r$), cede il vincolo relativo al punto di istantanea rotazione, le ruote del veicolo iniziano a slittare girando attorno al perno della ruota e il veicolo rimane nella stessa posizione senza avanzare.

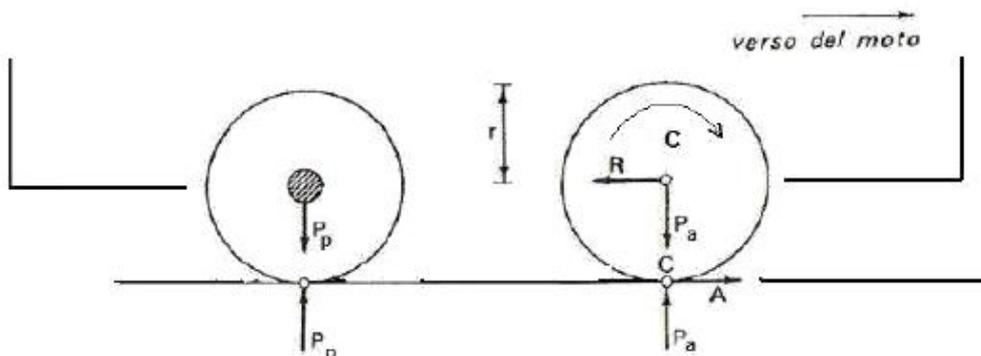


Figura 9: Interazione tra ruota motrice-rotaia [20]

Diverso risulta essere invece il caso di interazione ruota frenata-rotaiia (Figura 10). In questo caso non vi è l'applicazione di nessuna spinta motrice, e quest'ultima viene sostituita dalla forza di inerzia. Non sussiste più alcuna differenza tra ruota motrice e ruota trainata, il peso aderente diventa uguale al peso totale del veicolo e di conseguenza tutte le ruote diventano aderenti. L'aderenza a differenza del caso precedente cambia direzione e si oppone al verso del moto. Indicando con M_a la coppia per l'attrito dei perni, con M_f la coppia frenante e con I la forza di inerzia, valgono le seguenti condizioni:

- $\frac{M_a+M_f}{r} = A < P_a f_a$ Condizione di rotolamento.

- $\frac{M_a+M_f}{r} = A = P_a f_a$ Condizione di pattinamento.

La coppia frenante e quella dell'attrito dei perni determinano una resistenza che risulta essere pari all'aderenza, e quando questa raggiunge il suo valore limite la ruota si blocca e procede strisciando. Questo comporta un aumento dello spazio di frenatura e il danneggiamento del cerchione delle ruote.

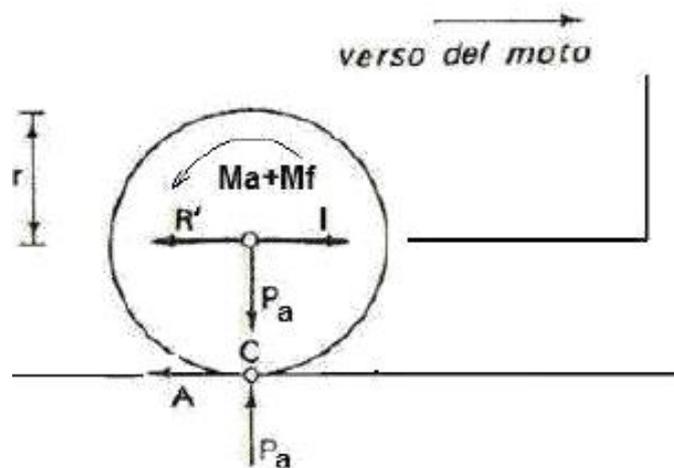


Figura 10: Interazione ruota frenata-rotaiia [20]

Il valore del coefficiente di aderenza f_a come precedentemente esposto, dipende da una moltitudine di fattori, quali: la natura dei materiali a contatto, la velocità di avanzamento del rotabile (diminuisce al crescere di questa), la geometria delle superfici a contatto, il peso aderente, (anche se per valori assiali compresi tra le 12 e le 22 tonnellate può essere trascurato), il valore della coppia motrice e lo stato delle superfici a contatto. Relativamente a quest'ultimo caso infatti, le rotaie non sono quasi mai pulite, e spesso vi può essere la presenza di olio, umidità, polvere, oppure di una sottile patina di ossido di ferro. Esistono diversi modi per ovviare a questo problema; si può intervenire mediante getto di vapore nella zona di contatto ruota-rotaia, oppure attraverso un getto di sabbia ad aria compressa. In questo modo il coefficiente di aderenza assume un valore più alto, specialmente in fase di trazione.

In via sperimentale, è possibile determinare il valore del coefficiente di aderenza f_a tramite la relazione espressa da Muller (1927) :

$$f_a = \frac{f_a (v=0)}{1 + 0,011 V}$$

Dove $f_a (v=0)$ (a velocità nulla) assume un valore pari a 0,25 in condizioni di rotaia asciutta, mentre in condizioni di rotaia umida, esso presenta un valore pari a 0.35; la velocità viene espressa in km/h. La determinazione del valore del coefficiente di aderenza in via sperimentale è stata realizzata portando a bloccaggio delle ruote un veicolo di peso P trainato a velocità costane; mediante l'utilizzo di un dinamometro, è stato misurato lo sforzo di trazione corrispondente allo sforzo frenante del veicolo stesso, ignorando le resistenze al moto. Dal rapporto tra la forza (corrispondente al max valore dell'ordinata, Figura 11) e il peso P del veicolo, è stato possibile individuare il valore del coefficiente di aderenza f_a .



Figura 11: Determinazione coefficiente aderenza con prove sperimentali [21]

Effettuando tali prove per differenti valori di velocità, sono state estrapolate due curve indicanti l'andamento di f_a sia in condizioni di rotaia asciutta che in condizioni di rotaia umida. Come è possibile dedurre dal grafico sottostante (Figura 12), il valore del coefficiente di aderenza è massimo quando la velocità è nulla, e decresce man mano che questa aumenta.

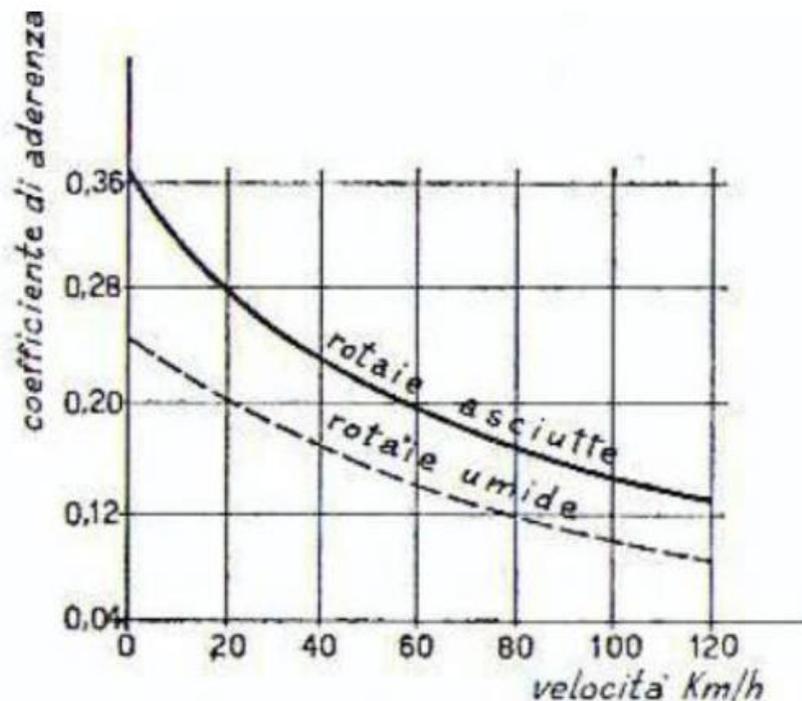


Figura 12: Determinazione del coefficiente di aderenza al variare della velocità [20]

Resistenze

Le forze passive, comunemente indicate con il termine “resistenze”, sono delle forze che si oppongono al moto del veicolo spinto dalla forza motrice, e sono funzione della velocità di marcia, della conformazione del percorso (presenza di curve e/o pendenze) e del veicolo stesso (forma, peso, dimensione). Tali resistenze al moto si dividono in:

- Resistenze ordinarie R_0 : sono sempre presenti e si oppongono al moto uniforme del veicolo sia in piano che in rettilineo ($V=cost$);
- Resistenze accidentali R_L : non sono sempre presenti, e sono funzione delle caratteristiche del tracciato plano-altimetrico. Inglobano al loro interno le resistenze di livelletta (pendenze) R_i , e le resistenze in curva R_C ;
- Resistenza di inerzia R_a : si riferisce solo alla traslazione del veicolo durante la marcia, e una variazione di velocità comporta la presenza di tale resistenza.

E' possibile dunque esprimere la resistenza totale al moto, mediante la seguente relazione:

$$R = R_0 \pm R_i + R_C \pm R_a$$

Resistenze Ordinarie

Le resistenze ordinarie R_0 , che sono sempre presenti, annoverano al loro interno la resistenza al rotolamento, la resistenza di attrito ai perni e la resistenza aerodinamica:

- Resistenza al rotolamento R_{RD} : tale resistenza è dovuta allo scorrimento fra le superfici a contatto e all'isteresi elastica dei materiali costituenti la ruota e la rotaia; infatti, l'energia che ha portato alla deformazione della ruota nella parte compressa (da una forma curva passa ad una forma piana), non viene restituita rapidamente, e questo causa un ritardo nella fase di ripristino della condizione primaria (forma curva). Tutto ciò comporta, nella fase di moto del veicolo, una distribuzione asimmetrica delle pressioni nella zona di contatto ruota-rotaia, ovvero la risultante di queste pressioni risulta essere decentrata di una certa quantità δ rispetto alla proiezione della forza peso gravante sui perni della ruota. In questo modo si viene a creare un momento derivante dalle due forze $P - P$ e dal braccio δ che si oppone al moto e si genera una resistenza al rotolamento.

$$R_{RD} = P \frac{\delta}{r}$$

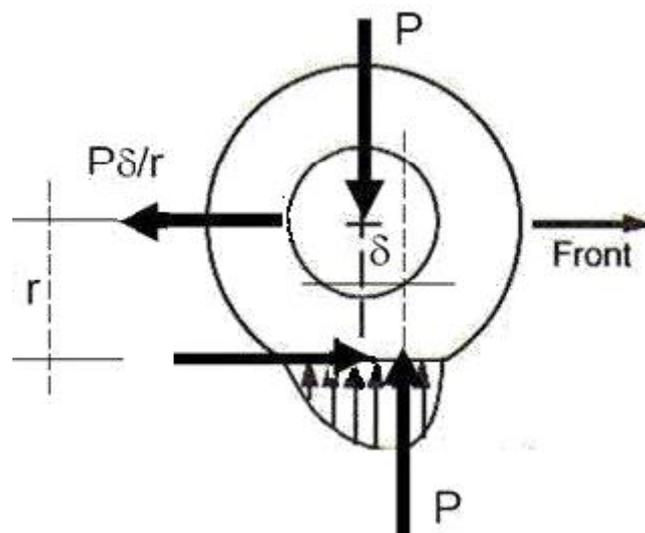


Figura 13: Resistenza al rotolamento [20]

- Resistenza di attrito ai perni R_{attr} [22]: questo tipo di resistenza si genera per effetto dell'attrito che sussiste tra perno e cuscinetto, ed assume forma e rilevanza differente a seconda se si ha a che fare con un cuscinetto di strisciamento o di rotolamento. Nel primo caso, il peso dell'intero veicolo viene scaricato sulle ruote mediante delle boccole, le quali tramite dei cuscinetti presenti al loro interno, ripartiscono questo peso sui perni. Poiché l'attrito tra i perni in acciaio e i cuscinetti è cospicuo, onde evitare la fusione del metallo di frizione, si interviene con un processo di lubrificazione attuato mediante l'utilizzo di oli minerali con opportune caratteristiche. Affinché il valore di resistenza ai perni risulti modesto, il rapporto tra il diametro dei perni e quello della ruota deve essere il più basso possibile. Per quanto concerne invece i cuscinetti a rotolamento, questi sono costituiti da due anelli contenenti delle sfere o dei rulli che rotolando senza strisciare all'interno di apposite corsie, garantiscono il moto rotatorio del perno e trasferiscono il carico. I valori di resistenza di attrito ai perni per cuscinetti a rotolamento rimangono pressoché costanti al variare della velocità, e in generale risultano essere minori di quelli per cuscinetti a strisciamento.

$$R_{attr} = P' f_{attr} \frac{d}{D}$$

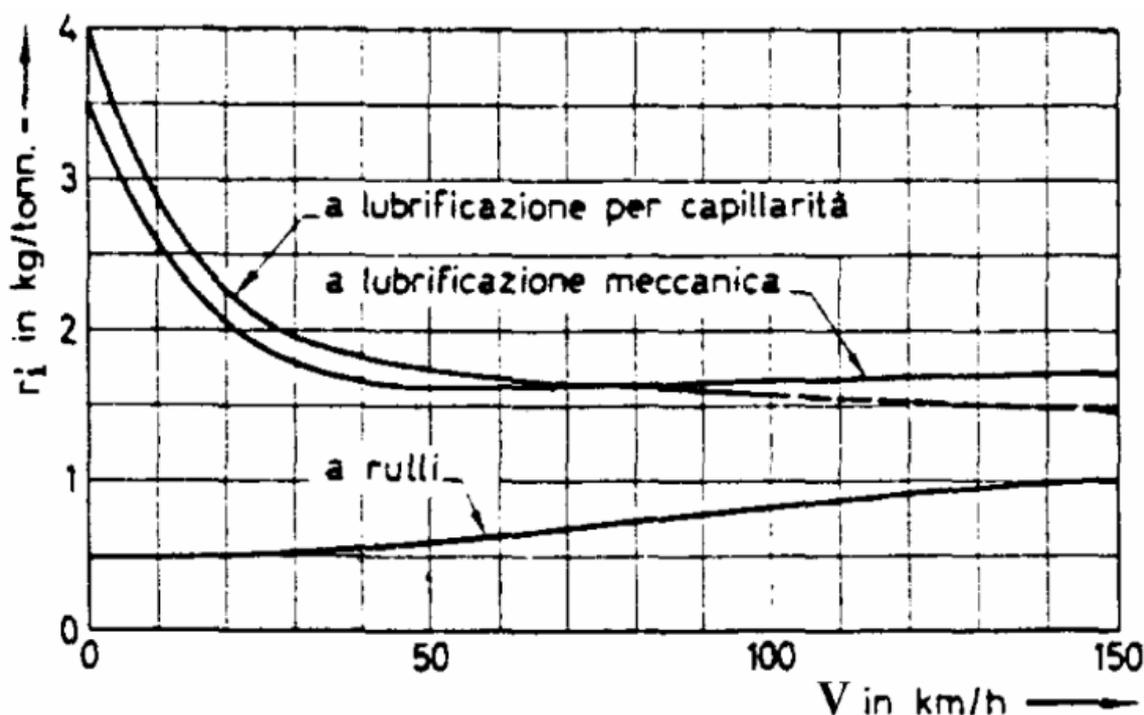


Figura 14: valori di resistenza specifica in kg/ton per cuscinetti a strisciamento e rotolamento [22]

- Resistenza aerodinamica R_{aer} : tale resistenza è causata dall'aria che il veicolo incontra durante il suo moto. Essa è determinata da una moltitudine di fattori, come la sovrappressione sulla superficie frontale del veicolo, l'attrito laterale tra le correnti d'aria e le pareti del convoglio (estensione veicolo, irregolarità nella forma, rodiggio) e la depressione posteriore dovuta ai vortici d'aria. Questa resistenza è espressa mediante la relazione di "Eiffel", la quale viene utilizzata per i veicoli che si muovono a basse velocità (inferiori a 100km/h), in quanto considera la forma del convoglio che si muove ad una velocità V e l'andamento delle pressioni e depressioni inerenti la forma stessa.

$$R_{aer} = p C S = \left(\frac{1}{2} \delta V^2 \right) C S$$

- p = pressione cinetica
- C = coefficiente di resistenza aerodinamica dipendente dalla forma del veicolo
- S = area della proiezione della superficie investita su un piano normale alla direzione del moto, comunemente indicata come superficie "Maestra"
- δ = densità dell'aria (1,226 Nm⁻³ a 15°C e 1 atm)
- V = velocità del veicolo in m/s

Durante la marcia di un treno in galleria, si ha un incremento di resistenza che è tanto maggiore quanto più la superficie del veicolo si avvicina alle pareti della galleria. Infatti l'aria viene messa in movimento per tutta la lunghezza del tunnel, a causa della resistenza che essa incontra, generando una sovrappressione sulla superficie frontale del treno e una depressione in coda.

Data la complessità dei fenomeni che intervengono nella determinazione delle suddette resistenze ordinarie inerenti il moto uniforme e orizzontale dei veicoli ferroviari, spesso queste ricerche di tipo teorico vengono perfezionate con quelle di natura sperimentale, dando origine ad espressioni di carattere empirico, le quali vengono adoperate da tutte le ferrovie per l'identificazione delle resistenze ordinarie che si oppongono all'avanzamento dei convogli in un moto piano ed orizzontale. I risultati pervenuti mediante l'utilizzo di tale formule, essendo quest'ultime fondate su prove di natura sperimentale, ovvero realizzate con determinati tipi di veicoli e condizioni di binari particolari, non possono essere considerati totalmente validi.

Di seguito viene riportata l'equazione binomia e trinomia utilizzata per la determinazione delle resistenze ordinarie in ambito ferroviario:

$$r_0 = a + b v^2 \quad [\text{N/KN}] \quad \text{Equazione binomia}$$

$$r_0 = a + b v^2 + C v \quad [\text{N/KN}] \quad \text{Equazione trinomia}$$

	a	b	c
Locomotiva elettrica di 80 tonnellate	100	0,8	0,003
Locomotiva elettrica di 120 tonnellate	150	1,2	0,03
Locomotive isolate	2,5	0,0003	
Treni passeggeri	1,5	1/4500	
Treni passeggeri leggeri	1,9	0,00027	
Treni merci a carico medio	2	1/2000	
Treni merci pesanti	1	1/4000	
Formula di Clark per basse velocità	2,4	1/1000	
Formula di Erfurt per medie velocità	2,4	1/1300	
Formula di Von Borries per alte velocità	1,6	0,3(1+50/v)/1000	
Formula di Baribier per alte velocità	1,6	0,456(1+10/v)/1000	

Figura 15: Coefficienti sperimentali usati per calcolare resistenze ordinarie [23]

Resistenze Accidentali

Le resistenze accidentali, come precedentemente indicato, sono quelle resistenze che dipendono dalla configurazione del tracciato plano-altimetrico. Esse comprendono al loro interno le resistenze di livelletta (pendenza) R_i , e le resistenze in curva R_c :

- Resistenza di livelletta R_i ,: tale resistenza dipende dalla presenza di tratti in pendenza (positiva o negativa), che un veicolo incontra durante il suo moto. Questa pendenza indicata con “i” ed espressa in ‰ a causa dell’aderenza limitata (max 30-35 ‰), indica il rapporto numerico tra le misure dell’innalzamento (verticale) e

l'avanzamento (orizzontale) del mezzo, e risulta essere opposta allo sforzo di trazione in salita, mentre è concorde in discesa.

In presenza di un piano inclinato, non è possibile trascurare la componente della forza peso P applicata al baricentro di un veicolo che si muove lungo la direzione del moto; di conseguenza questa viene scomposta in una componente $P \cos \alpha$ normale al piano di rotolamento, e in una componente $P \sin \alpha$ parallela al piano di rotolamento, e proprio quest'ultima avendo verso opposto a quello del moto, rappresenta la resistenza di livelletta.

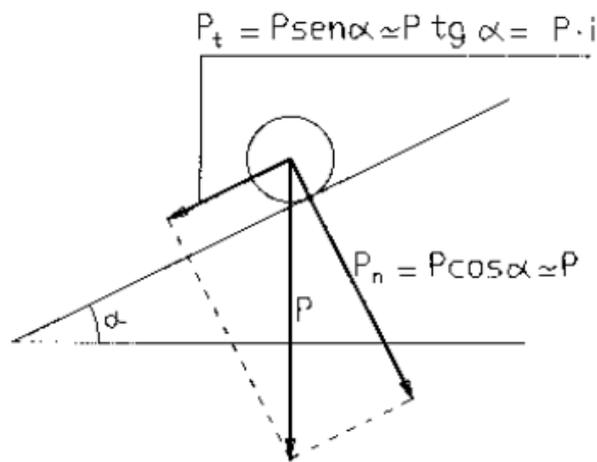


Figura 16: Resistenza addizionale per livelletta

Indicando le resistenze R in [kg] ed il peso del veicolo P in [ton] la resistenza di livelletta vale: $R_i = 1000 \cdot P \cdot \sin \alpha$ [kg]

Poiché in genere α è piccolo, si può confondere il seno con la tangente dell'angolo, per cui, essendo $i = \operatorname{tg} \alpha$, in definitiva si ha:

$$R_i = P \operatorname{tg} \alpha = P i$$

- Resistenza in curva R_c : tale resistenza è dovuta all'attrito causato dagli strisciamenti che sussistono tra il parallelismo delle sale montate e le rotaie, e all'attrito che la superficie laterale del fungo della rotaia esercita sul bordino delle sale montate tramite le quali il convoglio viene guidato in curva. Poiché in curva il tratto da percorrere della ruota esterna risulta essere maggiore rispetto a quello che deve percorrere la ruota interna, la conicità delle ruote e lo spostamento trasversale della sala

compensano solamente in parte la differenza di percorso, e ciò comporta un aumento dello sforzo di trazione con conseguente incremento di consumo energetico.

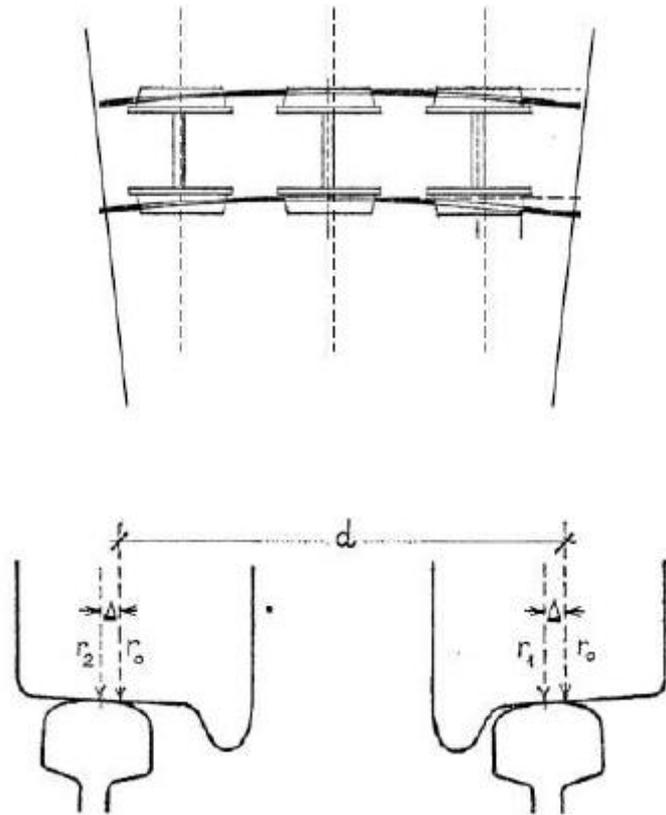


Figura 17: Atteggiamento del carrello in curva [20]

Al di sotto di raggi di curvatura pari a 1000 metri, la resistenza in curva non può essere trascurata; la determinazione di tale resistenza, ai fini progettuali avviene mediante l'uso della formula di "Van Rockl" espressa dalla seguente relazione:

$$r_c = \frac{m}{R-n}$$

$$R_c = P r_c$$

Raggio curva [m]	m	n
≥ 350	650	55
350-250	650	65
250-150	650	30

Tabella 5: Parametri progettuali resistenza in curva

- Resistenza di inerzia R_a : tale resistenza si riferisce alla traslazione del veicolo e non tiene conto della presenza di organi rotanti la cui massa oltre che traslare deve accelerare angolarmente. In fase di frenatura la forza di inerzia risulta essere negativa

e ciò porta ad una conservazione del moto. L'energia utilizzata da tale forza nella fase di avviamento del convoglio, a seguito di una trasformazione in energia cinetica, può essere nuovamente riutilizzata per consentire l'arresto del veicolo.

Caratteristica meccanica di trazione

La forza di trazione al cerchione F è una forza che un asse motore genera per effetto della sua coppia motrice, e mediante l'area di impronta viene trasferita alla rotaia.

La curva che mette in relazione tale sforzo di trazione al cerchione con la velocità viene indicata come "caratteristica meccanica di trazione".

$$T = f(v)$$

Generalmente nell'affrontare questo tipo di studio, si fa riferimento ad un motore a potenza costante, ovvero un motore ideale che risulta in grado di sviluppare una potenza costante a qualsiasi regime. La curva rappresentante la caratteristica meccanica di trazione ideale dovrebbe essere quindi un'iperbole, dove ad una diminuzione della velocità causata dalle resistenze che si oppongono al moto corrisponde un incremento dello sforzo di trazione e quindi il conseguimento di un nuovo equilibrio; in questo modo la potenza di trazione viene mantenuta costante.

Risulta quindi possibile esprimere la potenza "P" [KW], come il prodotto tra la velocità V [m/s] e lo sforzo di trazione trasmesso al cerchione:

$$P = T V$$

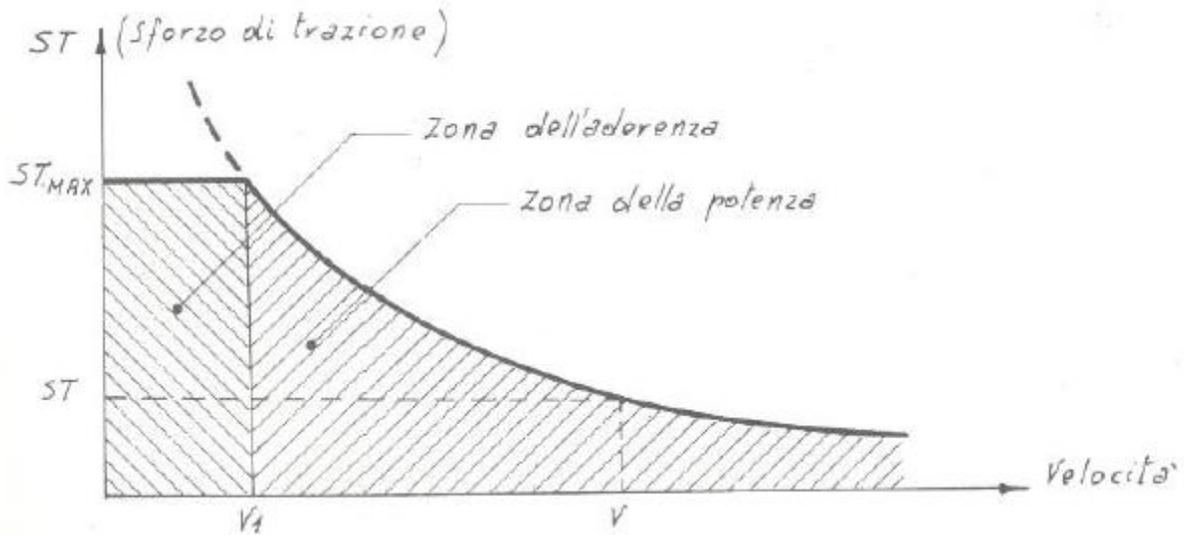


Figura 18: Caratteristica meccanica di trazione [24]

Come è possibile notare dal grafico soprastante (Figura 18), lo sforzo di trazione aumenta al diminuire della velocità, e per valori bassi di quest'ultima raggiunge valori elevati.

Ciò non è del tutto vero in quanto tale sforzo a basse velocità viene limitato dall'aderenza (zona dell'aderenza), mentre al crescere della velocità lo sforzo di trazione viene limitato dalla potenza (zona della potenza).

In realtà, a voler essere precisi, come precedentemente esposto, l'aderenza diminuisce all'aumentare della velocità. Di conseguenza, la forma della caratteristica meccanica ideale dovrebbe essere quella esposta di seguito:

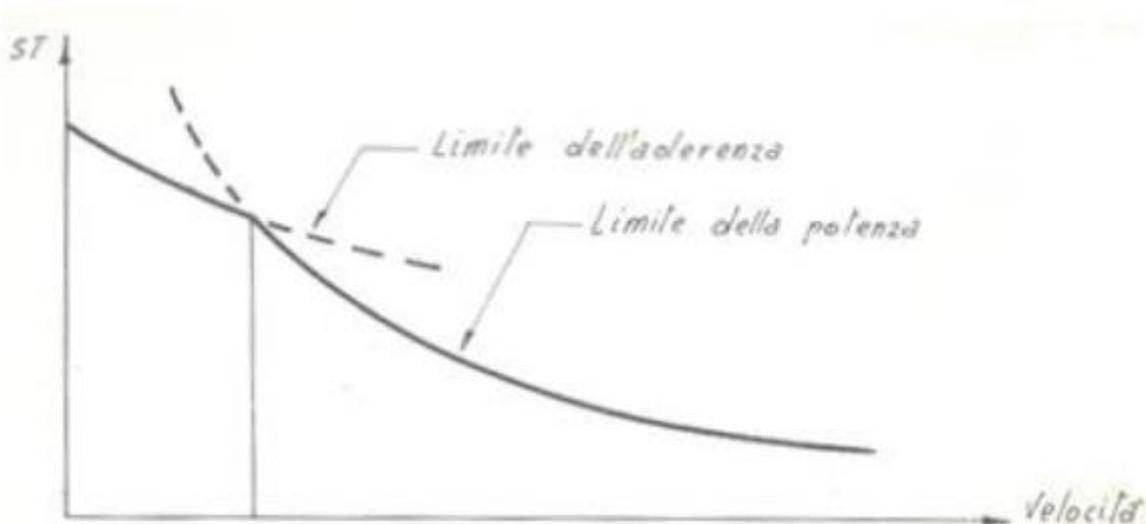


Figura 19: Caratteristica meccanica reale di trazione [24]

2.2.2. Velocità commerciale e parametri fondamentali

La velocità commerciale V_c risulta essere il parametro prestazionale più importante per definire la bontà di un sistema di trasporto, e rappresenta la velocità media mantenuta nel percorrere una tratta considerando i tempi di sosta alle stazioni. La velocità commerciale di un sistema di trasporto che opera in sede dedicata e protetta come la metropolitana è un parametro garantito, poiché non è influenzata da fattori esterni quali il traffico o il tipo di regolazione semaforica lungo il percorso, a differenza di quanto accade dei veicoli che circolano in sede promiscua o parzialmente protetta. Affinché la velocità commerciale raggiunga valori elevati, i tempi di sosta alle stazioni devono essere ridotti al minimo; essi comprendono i tempi di salita e discesa dei passeggeri e i tempi tecnici di apertura e chiusura porte. Un modo per velocizzare queste operazioni quindi potrebbe essere quello di dotare il convoglio di un gran numero di aperture e posti a sedere. In genere i tempi di sosta richiesti dai sistemi di trasporto che operano in sede riservata come le metropolitane variano dai 15 secondi al minuto, e ciò permette loro di raggiungere velocità commerciali che possono toccare i 45-50 km/h. E' possibile notare tutto ciò dal grafico sottostante (figura 20), il quale mette in relazione i tempi tecnici di sosta alle stazioni con la velocità commerciale V_c al variare della velocità massima del convoglio.

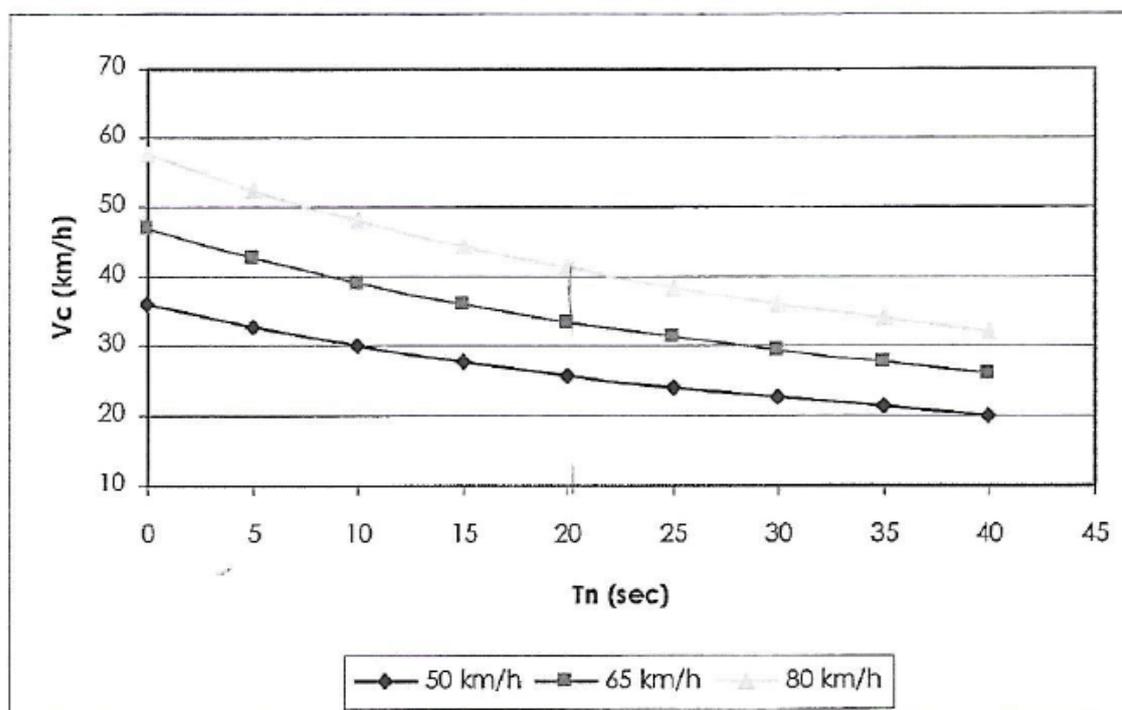


Figura 20: Influenza del tempo di sosta alle fermate sulla velocità commerciale, al variare velocità massima [2]

Supponendo un diagramma di trazione cosiddetto “standard”, ovvero che ingloba al suo interno tutte le fasi del moto (figura 21), è possibile notare come la velocità commerciale V_c risulta essere funzione del tempo di circolazione T_c , il quale a sua volta è costituito da tutti i tempi corrispondenti alle diverse fasi del moto.

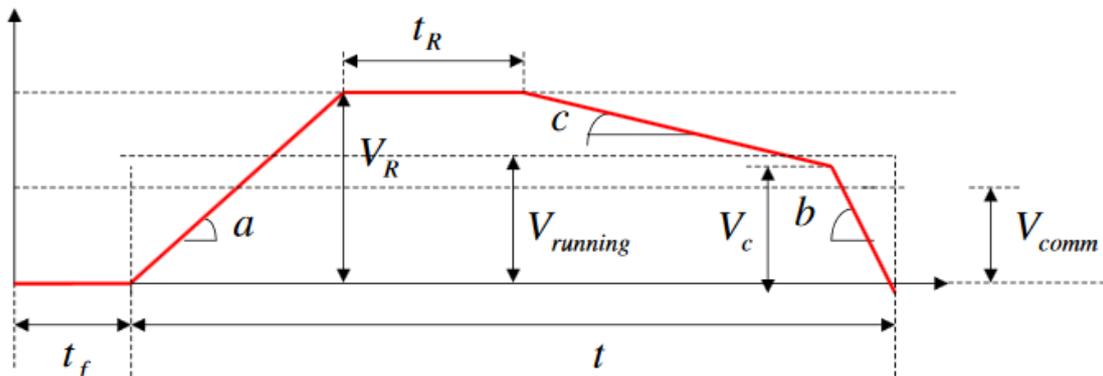


Figura 21: Diagramma di trazione standard

$$V_c = S/T_c = S/(t_a + t_b + t_v + t_c + nt_s)$$

- t_a tempo competente alla fase di accelerazione
- t_b tempo competente alla fase di decelerazione
- t_v tempo competente alla fase di regime
- t_c tempo competente alla fase di *coasting*
- t_s tempo di sosta alle fermate
- n numero di fermate

Il consumo energetico è strettamente collegato alla velocità commerciale V_c e la ricerca della soluzione ideale in grado di garantire il minor consumo energetico possibile deve essere effettuata con particolare cura e precisione; in maniera particolare bisogna prestare estremamente attenzione alla scelta dei valori relativi alla velocità massima, distanziamento tra fermate, accelerazione e fase di *coasting*.

In figura 22 è possibile avere un'idea dell'influenza della scelta della velocità massima per differenti valori di distanziamento delle fermate. Tale parametro definisce, in base alla differente velocità massima raggiungibile, una diversa velocità commerciale e un diverso consumo energetico. Per poter sfruttare al massimo la velocità raggiungibile dai veicoli è necessario che le stazioni siano sufficientemente distanziate, in modo tale da permettere a

quest'ultimi di raggiungere la velocità di punta. E' superfluo avere veicoli con velocità massime alte per tratti di linea brevi, in quanto l'incremento della velocità commerciale risulta essere nullo. A testimonianza di ciò il grafico suggerisce i valori massimi di velocità da adottare per brevi tratti di linea. Infine a ciascuna prestazione fa capo un differente valore di energia consumata il quale deve essere attentamente valutato e confrontato tra tutte le soluzioni possibili.

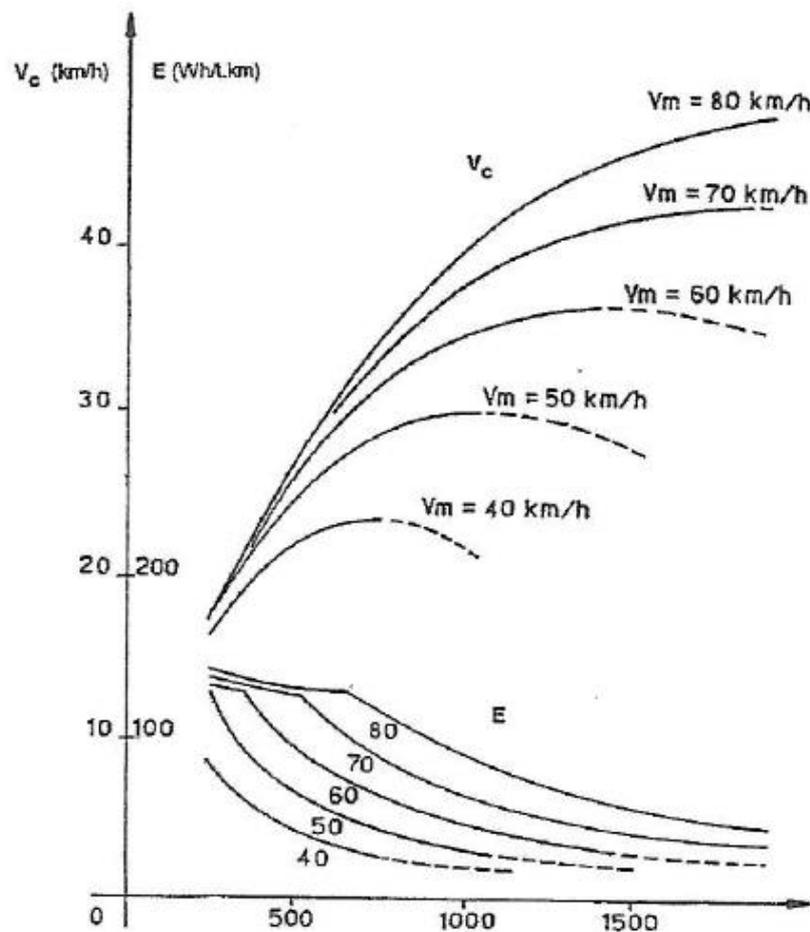


Figura 22: Velocità commerciale in funzione della velocità massima, distanziamento tra fermate e relativi consumi energetici [2]

Come il distanziamento tra fermate, anche la corretta scelta dei valori di accelerazione, in virtù della massima velocità raggiungibile, condiziona la velocità commerciale di un sistema di trasporto e il relativo consumo energetico. Infatti valori elevati di accelerazione, se da un lato aumentano la velocità commerciale, dall'altro influiscono pesantemente sui consumi energetici incrementando i costi necessari ad alimentare la linea. Tali valori (come descritto nel paragrafo successivo) non devono essere elevati onde compromettere il comfort dei passeggeri, soprattutto se sono previsti posti in piedi.

2.2.3. Fasi del moto

L'obiettivo di un sistema di trasporto consiste nel ridurre al minimo la durata del tempo di viaggio senza perdere mai di vista l'elemento fondamentale, ovvero la sicurezza del trasporto stesso. Il tragitto tra due fermate successive è caratterizzato dalle cosiddette “*fasi del moto*” proprie della meccanica della locomozione. Tali fasi comprendono:

- Accelerazione
- Regime
- *Coasting* o lancio
- Frenatura

<i>Fasi</i>	<i>Condizioni di moto</i>	<i>Velocità</i>	<i>Accelerazione</i>	<i>Forze</i>
Sosta		$v = 0$	$\frac{dv}{dt} = 0$	$F = 0$ $I = 0$ $R = 0$
Movimento	<i>avviamento</i> $+ F - R = M_e \frac{dv}{dt}$	$v > 0$	$\frac{dv}{dt} > 0$	$F > 0$ $I < 0$ $R \neq 0$
	<i>regime</i> $+ F = R$	$v > 0$	$\frac{dv}{dt} = 0$	$F = -R$ $I = 0$
	<i>rallentamento o lancio</i> $- R = M_e \frac{dv}{dt}$	$v > 0$	$\frac{dv}{dt} < 0$	$F = 0$ $I = -R$
	<i>frenatura</i> $- F - R = M_e \frac{dv}{dt}$	$v > 0$	$\frac{dv}{dt} < 0$	$F < 0$ $I > 0$ $R \neq 0$

Tabella 5: Caratterizzazione fasi di esercizio

Le quattro fasi del moto hanno un'importanza differente e non necessariamente durante il movimento vi è la presenza di tutte e quattro le fasi. Il movimento sussiste se e solo se è presente una fase di avviamento (accelerazione) e una fase di frenatura; la presenza delle altre fasi quali il *coasting* e il tratto a velocità costante (regime) è influenzata da altri fattori come ad esempio il distanziamento tra fermate successive.

Nella figura sottostante viene esposto il diagramma rappresentate il cosiddetto “ciclo standard del moto”, ovvero quel ciclo che comprende tutte le fasi meccaniche del movimento “a-r-l-f”. Tale diagramma viene comunemente indicato con il nome “diagramma di trazione” e risulta essere molto utilizzato in operazioni di tipo ferroviario. Tramite l’ausilio di tale diagramma è possibile calcolare le prestazioni di un treno, stimare il suo tempo di viaggio, fare delle valutazioni in merito al consumo energetico, programmare una nuova tratta o migliorarne una vecchia. Si tratta di grafici bidimensionali che mettono in relazione diverse grandezze (velocità-tempo-distanza), utili nel descrivere e nell’analizzare le diverse condizioni di esercizio della marcia di un convoglio ferroviario. Le aree comprese all’interno del diagramma di trazione corrispondono agli spazi percorsi nei rispettivi intervalli di tempo, mentre la tangente alla curva esprime la variazione istantanea di velocità. Questa può essere positiva o negativa, a seconda se $\alpha > 0$ oppure $\alpha < 0$.

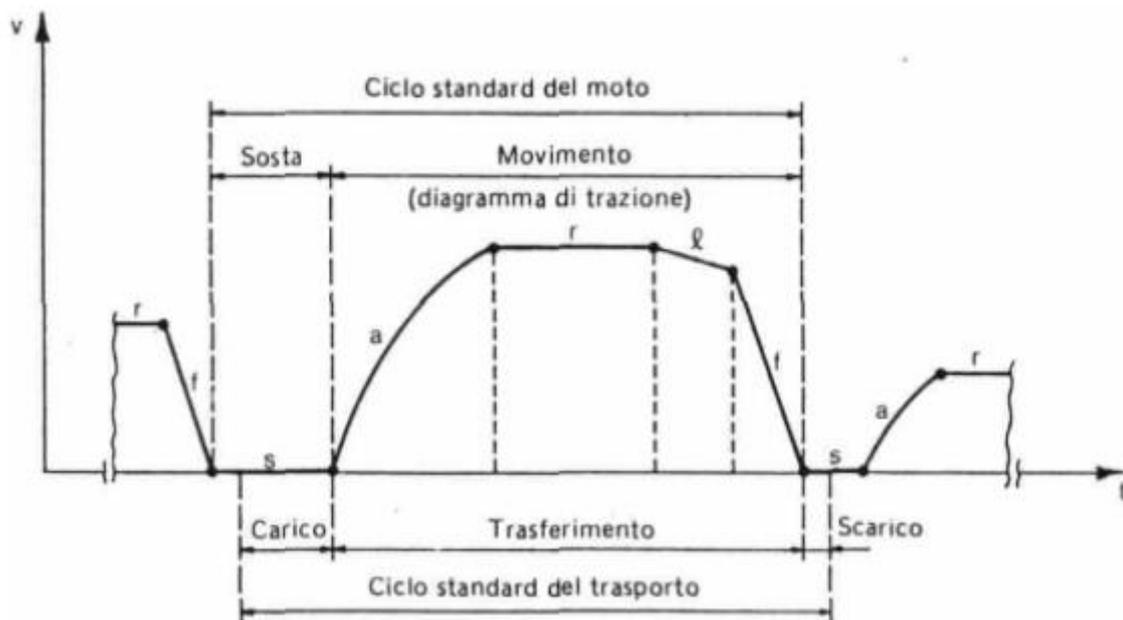


Figura 23: Cicli standard del moto

2.2.3.1. Accelerazione

L’accelerazione rappresenta la variazione di velocità nell’unità di tempo e viene espressa in termini differenziali come la derivata rispetto al tempo del vettore velocità dv/dt . Il parametro accelerazione risulta essere abbastanza importante nel caso di distanziamento piccolo tra

fermate successive (figura 24) poiché da esso dipende il raggiungimento della velocità massima sviluppabile dal sistema in funzione.

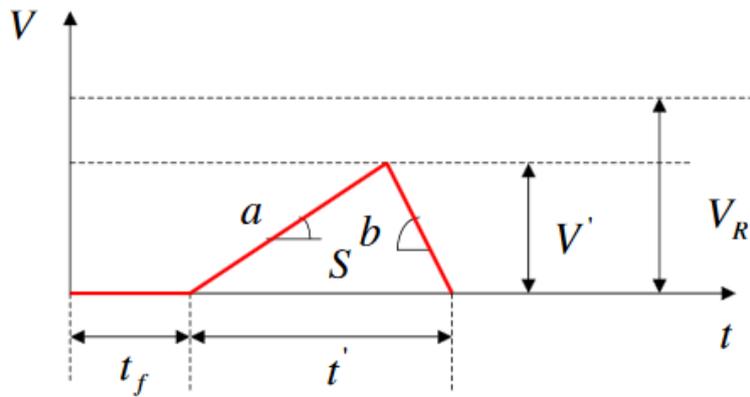


Figura 24: Distanziamento piccolo tra fermate successive

Elevati valori di accelerazione e decelerazione è vero che da un lato consentono ai veicoli di raggiungere rapidamente la velocità massima con un conseguente aumento della velocità commerciale, ma allo stesso tempo determinano un aumento dei consumi energetici e quindi dei costi di investimento dovuti alle installazioni di energia di alimentazione. Anche il comfort dei passeggeri a bordo risulta essere compresso soprattutto se sono previsti posti in piedi. A fronte di tali ragioni è buona norma assumere valori massimi di accelerazione e decelerazione non superiori a $1.2 - 1.3 \text{ m/s}^2$.

2.2.3.2. Regime

La fase di regime o marcia a velocità costante è quella fase in cui la variazione di velocità istantanea risulta essere nulla ($dv/dt=0$; $tga=0$ con $\alpha=0$). La presenza di tale fase del moto sussiste se e solo se il distanziamento tra fermate successive è maggiore della distanza necessaria al convoglio a raggiungere la velocità massima (figura 25).

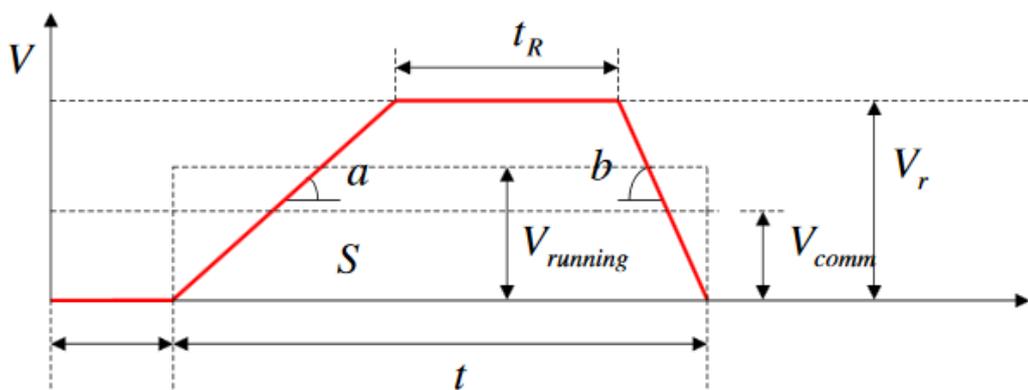


Figura 25: fase di regime

La velocità massima raggiungibile in linea dipende dalle caratteristiche della linea stessa (altimetria e planimetria del tracciato, distanziamento tra fermate successive, grado di protezione delle vie di corsa, ecc.) e dunque, non sempre corrisponde alla velocità di punta del convoglio. Il grado di protezione della linea gioca un ruolo fondamentale nel raggiungimento di velocità elevate, infatti nel caso di metropolitane classiche la velocità massima raggiungibile può addirittura toccare i 120 km/h. Nel grafico sottostante (figura 26) è possibile notare come la velocità massima in linea influisce sulla velocità commerciale. Per bassi valori di velocità massima la distanza tra le fermate risulta essere ininfluyente, mentre sistemi di trasporto contraddistinti da velocità elevate, come nel caso delle metropolitane, riescono ad esprimere tutte le loro potenzialità solo se le fermate presentano un distanziamento sufficientemente elevato. Nel caso studio affrontato in questo elaborato di tesi, sarà possibile visionare come i dati relativi alla velocità massima, commerciale e al distanziamento tra fermate rispecchiano perfettamente le curve rappresentate nel grafico sottostante.

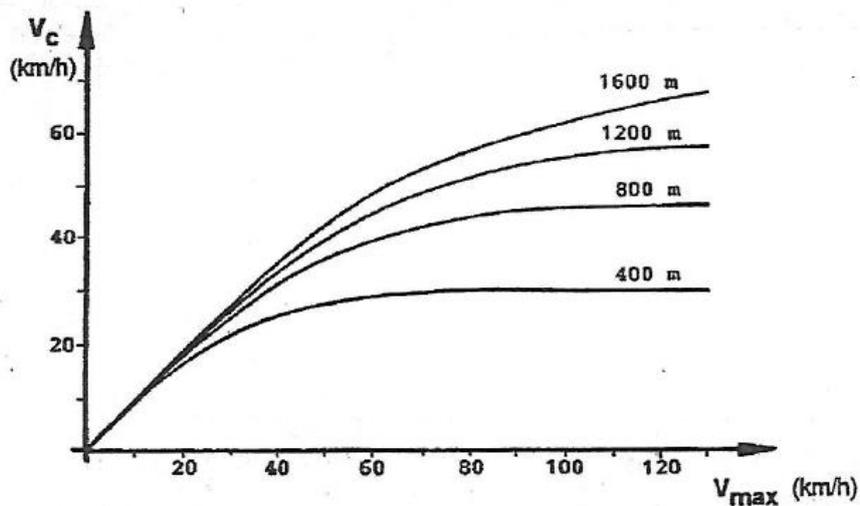


Figura 26: Relazione tra velocità massima, velocità commerciale e distanza tra le fermate[2]

2.2.3.3. Coasting

La fase di lancio o meglio conosciuta come fase di “*coasting*”, indicata con “l” nel diagramma di trazione (figura 27), è quella fase in cui viene sfruttata la ridotta resistenza al rotolamento facendo avanzare il veicolo per inerzia. Tale fase del moto deve essere scelta e valutata con particolare cura ed attenzione, in quanto a fronte di un piccolo incremento temporale di

percorrenza della tratta dovuto ad una leggera riduzione della velocità di marcia è possibile ottenere ingenti guadagni energetici e recuperi in caso di eventuali ritardi (figura 27). Lo studio effettuato in questo elaborato di tesi avrà come oggetto principale questa specifica fase del moto e verterà sulla corretta e accurata individuazione del limite di velocità della fase di *coasting*, in modo tale da programmare ad hoc il diagramma di trazione affinché risulti ottimizzato il rapporto consumi/prestazioni.

In figura 27 viene riportato un esempio di diagramma di trazione accompagnato dai consumi energetici.

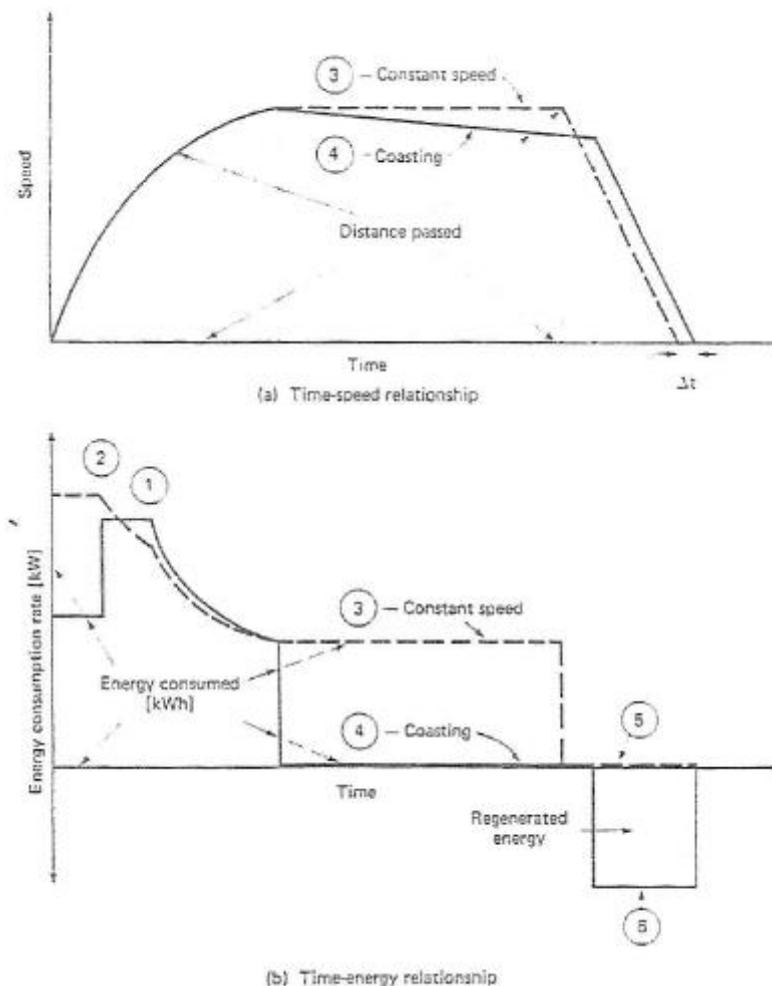


Figura 27: confronto dei consumi energetici nelle varie fasi di un diagramma del moto [2]

La fase che necessita del quantitativo maggiore di energia, come è possibile visionare dalla figura soprastante, è la fase di accelerazione, in quanto deve essere vinta l'inerzia al moto del veicolo. In ambito metropolitano, nei convogli a guida automatica, tale fase risulta essere abbastanza elevata con valori dell'ordine di $1,1-1,2 \text{ m/s}^2$. Successivamente, raggiunta la velocità massima, si ha la fase di velocità costante accompagnata da un costante consumo energetico (tratto 3 del grafico). Nel caso invece si ricorra al *coasting* (tratto 4 del grafico), a

fronte di un piccolo incremento temporale si ha un notevole risparmio energetico. Infine l'ultimo tratto del grafico riguarda la fase di frenatura. Questa può essere di tipo *tradizionale* (tratto 5), oppure *a recupero energetico*. Nel caso in cui il convoglio fosse dotato di frenata a recupero energetico si ha un consumo negativo (tratto 6), corrispondente ad una re-immissione in linea di energia adoperabile da un altro treno oppure utilizzabile per alimentare gli impianti ed i servizi all'interno delle stazioni. E' compito dei progettisti e dei gestori studiare e adoperare tutti i possibili provvedimenti per ridurre al massimo i consumi e di conseguenza i costi di esercizio. Attualmente nel caso di convogli a guida manuale, si cerca di addestrare il personale ad una condotta di guida improntata meno a brusche accelerazioni e decelerazioni ma più all'utilizzo della fase di *coasting* tramite l'ausilio di dispositivi di assistenza alla guida che suggeriscono al conducente la corretta velocità di marcia da adottare. Affinché possa sussistere ed essere sfruttata al meglio la condizione di marcia inerziale, come nel caso della fase di regime descritta in precedenza, deve sussistere un distanziamento minimo tra stazioni successive che garantisca al veicolo di poter raggiungere elevati valori di velocità. Ovviamente il tempo necessario a coprire la distanza tra le fermate non può e non deve essere elevato altrimenti si andrebbe a compromettere la velocità commerciale V_c . Tutto ciò comporterebbe l'inserimento di un numero maggiore di convogli sulla linea per mantenere lo stesso livello di servizio (numeri di treni sulla linea) con conseguente incremento del costo globale dell'intero sistema. Al massimo è possibile intervenire sulle prestazioni dei veicoli in termini di accelerazione/decelerazione e velocità massima. Infatti come mostrato in figura 28, raggiungere decelerazioni più elevate, senza oltrepassare il limite di 1,2-1,3 m/s^2 per decelerazioni in esercizio (onde pregiudicare il comfort dei passeggeri), permette di mantenere inalterato il tempo di percorrenza e di massimizzare la durata della fase di *coasting*.

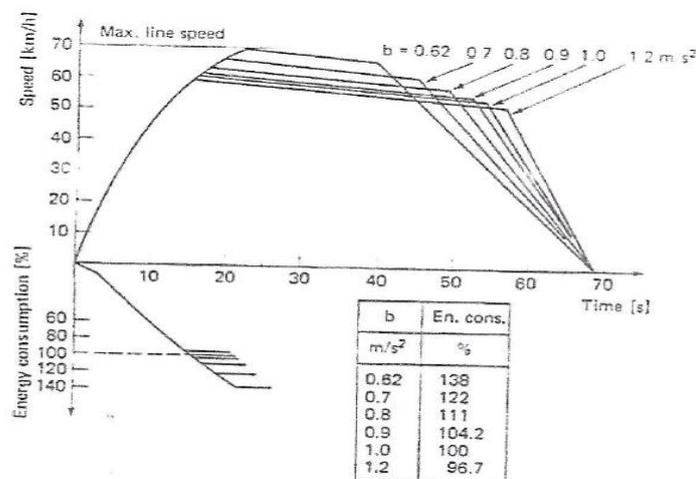


Figura 28: Consumo energetico in funzione durata del *coasting* [2]

2.2.3.4. Frenatura

La fase di frenatura rappresenta l'ultimo tratto del diagramma di trazione (figura 23) indicata dalla lettera "F". In tale tratto la variazione istantanea di velocità dv/dt è <0 con $tg\alpha < 0$.

I più moderni ed efficienti sistemi di trasporto ferroviario a trazione elettrica presentano motori di trazione che, oltre ad essere impiegati nella fase di avviamento e nella fase di marcia del convoglio, vengono adoperati anche durante la fase di frenatura.

La frenatura elettrica, oltre a garantire un ingente risparmio sui costi di manutenzione generati dalla sostituzione di alcune parti soggette ad usura caratterizzanti i sistemi frenanti ad attrito (critico oltre 160-180 km/h), favorisce in maniera tecnicamente vantaggiosa le operazioni di arresto e tenuta in discesa del convoglio. Tali motori di trazione durante la fase di frenatura, in seguito ad un'opportuna configurazione (l'albero motore del generatore è montato direttamente sull'albero di trasmissione del veicolo, formando un unico albero), funzionano da generatori e risultano essere in grado di assorbire una certa quantità di potenza meccanica dall'albero. La potenza meccanica assorbita risulta essere pari a:

$$P_a = \eta_i \cdot P_f$$

Dove P_f rappresenta la potenza frenante trasmessa al cerchione ottenuta dal prodotto tra lo sforzo frenante e la velocità di marcia, mentre η_i indica il grado di efficienza degli ingranaggi di trasmissione. La potenza elettrica trasmessa ai morsetti (indicata nella formula sottostante con P) risulta essere uguale al prodotto tra il rendimento totale del motore e degli ingranaggi η_t e la potenza frenante trasmessa al cerchione P_f .

$$P = V \cdot I = \eta \cdot P_a = \eta \cdot \eta_i \cdot B \cdot v = \eta_t \cdot B \cdot v$$

Qualora il circuito di trazione risulta essere in grado di trasferire la potenza elettrica prodotta alla linea di contatto tramite i motori funzionanti da generatori, è possibile effettuare la "frenata a recupero di energia". Questo tipo di frenata contraddistingue i più moderni sistemi di trasporto ferroviario a trazione elettrica e devono essere soddisfatte due condizioni affinché essa risulti praticabile:

- Il circuito di trazione deve essere dotato di convertitori elettronici reversibili oppure opportunatamente commutati;
- La potenza elettrica deve essere assorbita da un carico, ovvero un secondo convoglio che percorre la medesima linea. Nel caso in cui nell'istante considerato non vi sia in linea la presenza di un secondo convoglio in grado di assorbire questa potenza elettrica, essa viene assorbita dalle sottostazioni elettriche dislocate lungo la linea a patto che queste siano di natura reversibile.

Il recupero energetico risulta essere abbastanza significativo nelle linee soggette a traffico molto intenso dove, soprattutto nelle ore di punta, il numero dei convogli presenti è molto elevato. Nonostante gran parte dell'energia restituita venga dissipata nel circuito di linea per effetto Joule, all'interno dei contesti metropolitani è possibile raggiungere riduzioni dei consumi energetici dell'ordine del 20 – 30%.

Se nessuna delle condizioni precedentemente esposte non viene soddisfatta, la frenatura a recupero di energia non può sussistere e in questo caso può intervenire la “*frenatura reostatica*” se presente (la potenza elettrica viene dissipata per effetto Joule a bordo del veicolo in un reostato di frenatura), oppure la “*frenatura meccanica*” che come indicato in precedenza comporta notevoli costi di manutenzione generati dalla sostituzione di alcune parti soggette ad usura.

2.2.2. Capacità e potenzialità di una linea

La potenzialità di una linea viene definita come “il numero massimo di convogli che, in un dato istante temporale, può transitare in una determinata sezione”. Essa risulta essere pari all'inverso del distanziamento minimo temporale D_t (*headway*) e viene espressa mediante la seguente relazione:

$$P = \frac{3600}{D_t} \quad [\text{treni/h}]$$

Considerando una sezione di linea isolata, è possibile distinguere due tipi di capacità:

- Capacità nominale C_n : viene definita come “l'inverso del distanziamento minimo temporale D_t che può essere garantito con continuità nell'unità di tempo in condizioni

di sicurezza”, ed è funzione della tipologia dei sistemi di circolazione adottati lungo la linea. Tale capacità tiene conto delle cosiddette “condizioni ideali” di esercizio e non prende in considerazione imprevisti e disturbi che avvengono nella realtà. Tale capacità C_n può essere espressa in termini di [treni/h], oppure noto il numero di veicoli per convoglio N e la capacità di ognuno p , in passeggeri trasportati [pass/h]. Di seguito vengono riportate entrambe le relazioni:

$$C_n = \frac{3600}{D_t} \quad [\text{treni/h}] \qquad C_n = \frac{3600 p N}{D_t} \quad [\text{pass/h}]$$

- Capacità Effettiva C_E : Tale capacità tiene conto delle condizioni normali di esercizio e fornisce una misura più realistica rispetto alla precedente. Essa è ottenuta moltiplicando la capacità nominale C_n per il fattore di carico σ e per il fattore di utilizzazione Γ , entrambi minori di 1. Il primo equivale al rapporto che sussiste tra l’occupazione media dei veicoli e l’occupazione massima teorica, con valori che variano tra 0.8-0.95; in fase di progettazione si possono assumere dei valori in funzione del grado di comfort che si vuole attribuire all’utente. Il fattore di utilizzazione Γ invece, esprime il rapporto tra il distanziamento minimo temporale e l’effettivo valore che può essere realmente rispettato al fine di avere un’elevata regolarità del servizio; Γ assume valori compresi tra 0.7-0.9. Di seguito vengono proposte le relazioni per il calcolo della Capacità effettiva C_E :

$$C_E = \frac{3600 \Gamma}{D_t} \quad [\text{treni/h}] \qquad C_n = \frac{3600 p N \Gamma \sigma}{D_t} \quad [\text{pass/h}]$$

2.3. Segnalamento ed automazione

2.3.1 Caratteristiche dei sistemi di segnalamento

Il principale scopo dei sistemi di segnalamento ferroviario ad uso metropolitano, consiste nel garantire la marcia dei convogli ferroviari in tutta sicurezza evitando deragliamenti, collisioni con altri veicoli lungo la linea, che possono compromettere l'integrità degli utenti.

Nel corso degli anni tali sistemi, in seguito allo sviluppo di nuove tecnologie sono stati oggetto di notevoli cambiamenti. Il posizionamento dei segnali lungo la linea, che fino a poco tempo fa risultava essere la soluzione più originale e sicura per trasmettere le informazioni ai guidatori, oggi sta lasciando sempre più spazio alla cosiddetta "trasmissione a bordo". Esistono diverse tecnologie sul mercato che consentono la trasmissione dei dati tra i sistemi posti a terra e quelli situati a bordo treno. Lo scambio di questi dati, come nel caso della linea M5 di Milano, può avvenire mediante l'uso di correnti codificate attraverso le rotaie, con un sistema radio/wireless (Linea M4 di Milano), oppure tramite *loop* induttivi collocati tra i binari[13].

Una volta acquisite queste informazioni inerenti alla velocità obiettivo, alla velocità di linea, alla direzione e distanza da percorrere, la marcia del convoglio in totale sicurezza è garantita da un sofisticato sistema di sicurezza "ATP" (*Automation Train Protection*), il quale tramite l'elaborazione di vari profili "*speed-distance*" e curve di frenatura, permette il non superamento della velocità massime consentite in funzione delle caratteristiche del tracciato e delle condizioni di circolazione. Tale sistema si interfaccia costantemente con il reale profilo di guida generato dall'ATO (*Automatic Train Operation*), ovvero il sistema che si occupa della regolazione della velocità del treno secondo quanto prefissato o indicato dall'ATS (*Automatic Train Supervision*) in osservanza dei limiti di velocità imposti dall'ATP. Qualora questo limite fosse superato, il sistema avvisa il macchinista tramite allarmi audio in modo da poter correggere la velocità, altrimenti dopo 3 secondi interviene automaticamente con una frenata di emergenza oppure con l'utilizzo del freno in supervisione, a seconda della gravità del limite violato.

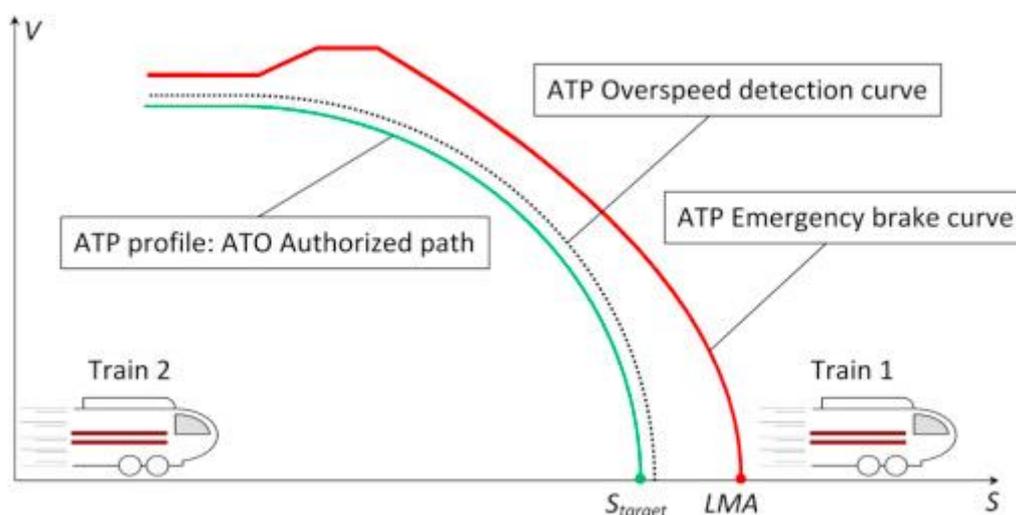


Figura 29: Profilo del sistema di blocco [14]

Un'altra funzione molto importante che compete al sistema di segnalamento è quella relativa alla "localizzazione" o "identificazione" dei veicoli. Nel caso di blocco mobile, la localizzazione si verifica tramite uno scambio continuo di informazioni via radio/wifi, tra il sistema di bordo e l'unità centrale e viceversa. L'apparato di bordo comunica la posizione e la velocità del treno, ottenuta mediante l'ausilio di dispositivi posti a terra, quali ad esempio *eurobalise*, incroci di *loops*, *loops*, mentre l'unità centrale una volta ricevute le informazioni, trasmette il cosiddetto "MAL" (limite di autorizzazione al movimento). In questo modo il sistema di bordo determina il profilo di velocità ideale in base alle proprie caratteristiche di peso e frenatura, garantendo la marcia del treno in perfetta sicurezza [13].

Per quanto riguarda i sistemi a blocco fisso invece, la localizzazione dei treni avviene via radio, oppure attraverso l'uso di circuiti di binario a correnti codificate; una volta che il primo asse del treno occupa il circuito di binario, il contatto tra ruota e rotaia provoca il cortocircuito delle correnti codificate, e di conseguenza il segnale non riesce ad arrivare dal trasmettitore al ricevitore posto a valle. Questo determina la presenza del treno su quella determinata sezione e ne impedisce l'accesso ad altri veicoli.

2.3.2 Segnalamento a blocco fisso

Il sistema di segnalamento a blocco fisso per molti anni è stato il sistema di segnalamento più utilizzato all'interno delle principali linee metropolitane di tutto il mondo.

Il concetto è basato nel suddividere l'intera linea in sezioni cosiddette di "blocco" in grado di ospitare un solo treno. Di conseguenza la capacità della linea risulta essere inversamente proporzionale rispetto alla lunghezza delle sezioni di blocco, le quali devono garantire la fermata del treno in tutta sicurezza evitando il rischio di collisioni con i veicoli che precedono. La lunghezza di queste sezioni all'interno di un contesto metropolitano può variare fino a qualche centinaio di metri a partire dall'inizio del punto di rallentamento, in quanto dipende dalla velocità massima raggiunta su quella sezione e dalla frequenza di passaggio [13]. La logica di funzionamento è abbastanza semplice. Tramite dei dispositivi posizionati lungo le varie sezioni (circuiti di binario a correnti codificate, via radio), viene localizzata la presenza di un treno all'interno di una di queste, e se ciò si verifica, il segnale di ingresso alla sezione diventa a via impedita, condizionando tutti gli altri segnali relativi alle sezioni situate a monte di quella di blocco, i quali ricevono indicazioni sulle limitazioni di velocità da seguire prima che il segnale ritorni ad essere a via libera. Le informazioni inerenti all'identificazione del veicolo sono analizzate dai sistemi posti lungo la linea i quali, a seconda delle condizioni di segnalamento, elaborano profili di marcia ideali che vengono trasmessi ai treni che seguono.

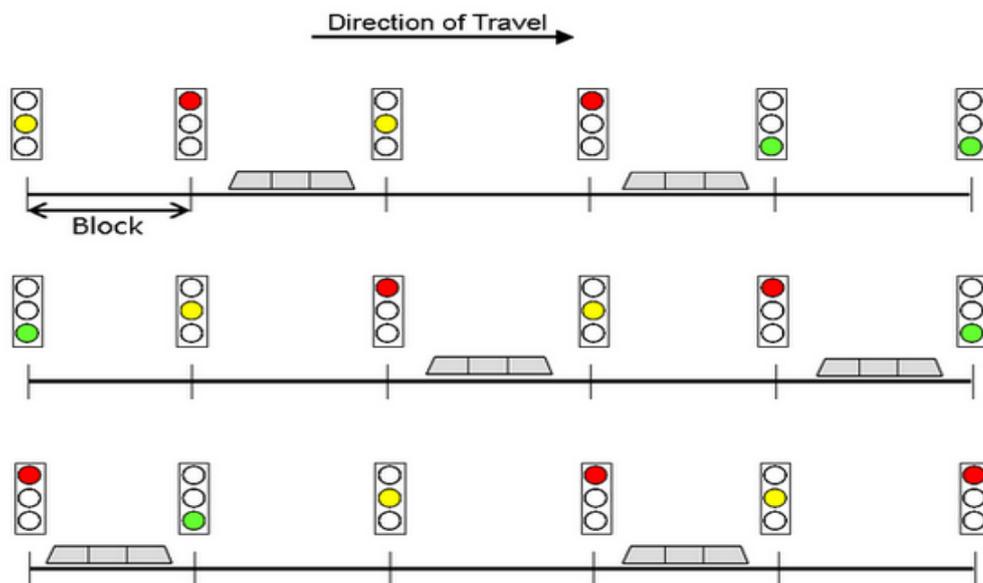


Figure 30: Sistema di segnalamento a blocco automatico.

I sistema di segnalamento a blocco fisso possono essere classificati anche in base al tipo di ripetizione dei segnali a bordo, infatti sono presenti sistemi di tipo continuo e di tipo discontinuo:

- continuo (RSC – Ripetizione segnale continuo): la trasmissione dei dati terra- treno sulla velocità da adottare all'interno di una sezione di blocco avviene mediante l'uso di circuiti di binario a correnti codificate oppure via radio nei sistemi più evoluti. La possibilità di poter correggere in maniera continua la marcia del treno, adattandola di conseguenza alle eventuali modifiche degli aspetti successivi apportate dal treno che lo precede, è sinonimo di un buon livello sicurezza e garantisce buone prestazioni;
- discontinuo (RSDD-Ripetizioni Segnali Digitali Discontinua): in questo caso invece, la comunicazione delle informazioni inerenti la velocità da adoperare all'interno della sezione non avviene di continuo, ma solamente in presenza dei segnali luminosi. Qualora la linea fosse provvista di ripetizione in cabina del segnale, esistono delle “boe comunicative” che comunicano al treno l'aspetto del segnale ad esso connesso.

Architettura Funzionale

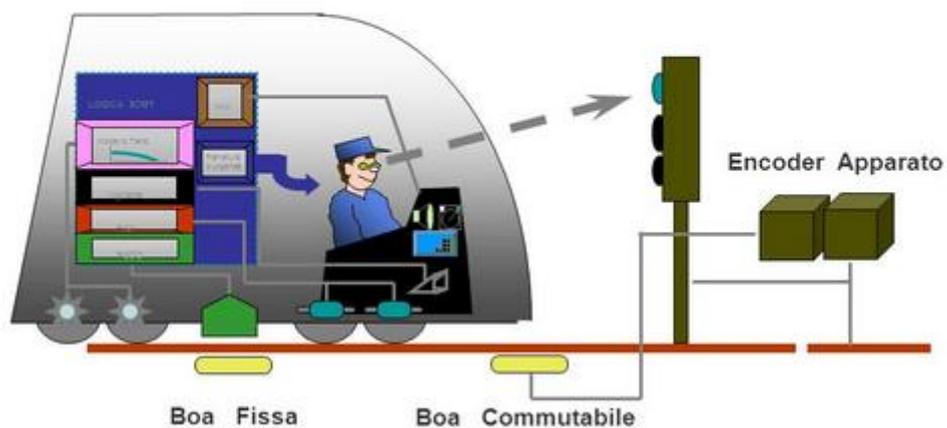


Figura 31: Trasmissione discontinua delle informazioni [15]

2.3.3 Segnalamento a blocco mobile

La necessità di far fronte ad una domanda di mercato sempre più crescente ed esigente, dovuta ad un incremento del flusso di passeggeri da trasportare, ha condotto negli ultimi anni molte aziende leader nel settore allo sviluppo e all'implementazione di nuove tecnologie che hanno permesso di svincolarsi dall'utilizzo del blocco fisso verso un nuovo sistema di blocco, ovvero il "blocco mobile". Questo particolare sistema di blocco basato sulla localizzazione costante della posizione, velocità e direzione di marcia di tutti i treni presenti lungo la linea, a differenza di quanto accadeva con il blocco fisso, dove la distanza dei treni non era funzione della velocità ma solamente della distanza, garantisce un distanziamento minore pari alla differenza che sussiste tra la coda del treno che precede e la testa di quello che segue incrementata di una distanza di sicurezza (evidenziata in giallo in Figura 32) dovuta all'incertezza del rilevamento esatto della posizione del treno lungo la linea (dipendente dal sistema odometrico), più una distanza dovuta ai tempi tecnici, funzione della trasmissione, elaborazione delle informazioni e del tempo impiegato per regolare la marcia del treno .

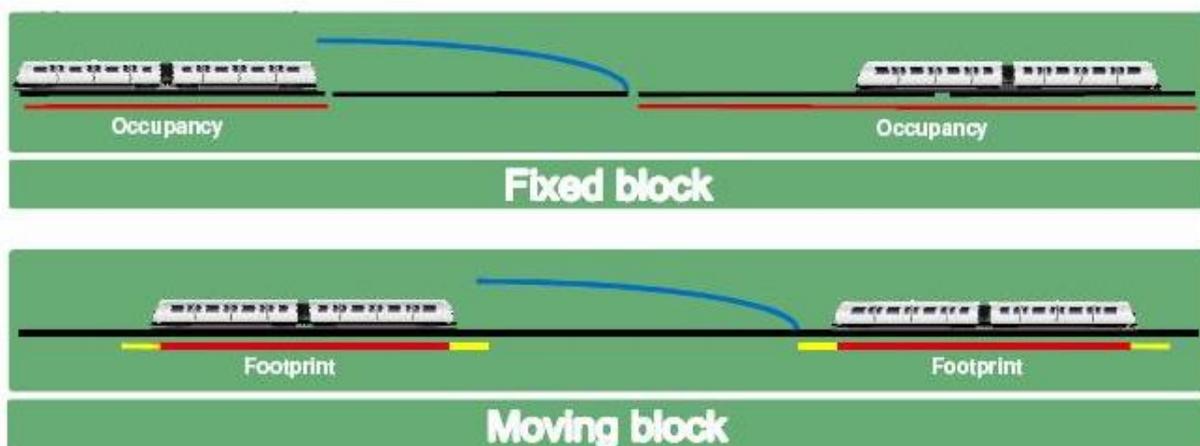


Figura 32: Distanziamento dei treni con sistema di segnalamento a blocco fisso e blocco mobile

La possibilità di avere un distanziamento minore tra treni consente di incrementare la capacità della linea e di conseguenza la frequenza di passaggio dei veicoli. Una frequenza di 30 tph (*train for hour*), viene considerata una frequenza elevata [16], anche se nelle più moderne linee metropolitane dotate di impianto di segnalamento a blocco mobile è possibile raggiungere un cadenzamento progettuale minimo di 60 secondi. Da questo scaturiscono numerosi altri vantaggi che hanno portato le principali linee metropolitane di tutto il mondo (Vancouver, Toronto, Ankara, Singapore, Hong-Kong, Kuala Lumpur, New York City JFK,

Guangzhou L3 L4 L5, Shanghai, Dubai, Milano L1-L4, ecc.) ad adottare il blocco mobile, quali ad esempio la qualità del servizio offerta tradotta nel minor tempo di attesa dei passeggeri alle stazioni, la maggiore flessibilità di esercizio che consente di regolare la circolazione dei treni in modo da adattarla alla domanda di traffico e la possibilità di adoperare veicoli più piccoli e più leggeri che hanno un impatto minore sulle opere civili e sui consumi energetici.

La logica di funzionamento del blocco mobile talvolta identificato come CBTC “*Communications-based train control*” consiste nel suddividere in “aree” l’intera linea, ciascuna presidiata da apparati centralizzati e computerizzati ZC (*Zone Controller*), i quali una volta ricevute le informazioni dal sistema di bordo CC (*Carborne Controller*) inerenti alla posizione e all’orientamento dei veicoli calcolati tramite *Eurobalise*, e le informazioni derivanti dagli apparati posti lungo la linea WSP, determinano la posizione di tutti i treni e assegnano ad ognuno di essi il cosiddetto “MAL” (limite di autorizzazione al movimento). Una volta ricevuto il “MAL”, il CC (sistema di bordo) procede con l’elaborazione di 3 curve di controllo, che definiscono i limiti operativi di marcia del singolo convoglio in modo da garantire la frenata di quest’ultimo in totale sicurezza evitando collisioni con il treno che precede. Per il calcolo di tali curve, il sistema di bordo considera anche limitazioni di velocità temporanee (TSR) ed eventuale presenza di deviatori. L’interconnessione tra tutti questi apparati è garantita dal reti DCS (Sistema Comunicazione Dati) con l’impiego di *Access Points* (AP) posizionati lungo la linea, che offrono la possibilità di un continuo scambio bidirezionale dei dati terra-treno, treno-terra radio [13].

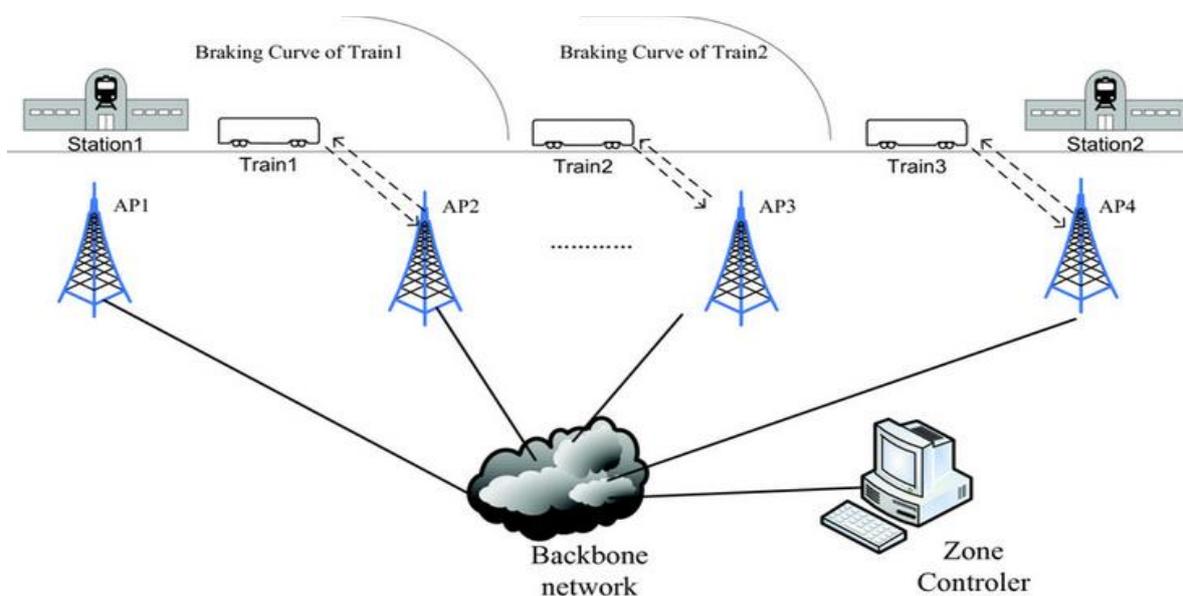


Figura 33: Sistema di comunicazione dati CBTC [17]

In caso di mal funzionamento del sistema di trasmissione dati, la marcia di tutti i convogli si arresterebbe totalmente. Nel caso specifico della Linea ML4 di Milano dotata di blocco mobile, il sistema DSC ASTS risulta essere completamente ridondato e dovrebbero susseguirsi tre guasti di fila nei corrispondenti *Access Points* distribuiti lungo l'intera linea prima che la comunicazione dati tra terra-treno venga interrotta. Una volta riparato il guasto, il sistema CBTC è in grado di localizzare nuovamente la posizione di tutti i treni e di garantire la marcia di questi in completa sicurezza [13].

Infine un'ultima considerazione da fare riguarda l'aumento di capacità della linea all'interno dei sistemi metropolitani. Se da un lato questo risulta essere uno dei principali vantaggi indotti dall'applicazione del blocco mobile, dall'altro, un aumento della frequenza di passaggio dei treni, si può tramutare in uno svantaggio. Infatti, i più evoluti sistemi di ventilazione, necessitano un distanziamento tra treni pari a circa 200-300 metri per una corretta circolazione dell'aria all'interno dei tratti in galleria ove vi è la presenza di più treni, mentre i distanziamenti ottenuti mediante applicazione del blocco mobile risultano essere dell'ordine di 80-100 metri. In tal caso, per ovviare a tale problema, occorre installare impianti di ventilazione molto più potenti e costosi.



Figura 34: Sistema di ventilazione in una linea metropolitana [18]

2.3.4 Livelli di automazione

L'accostamento del termine "automatico" a quello di "guida senza conducente" non risulta essere propriamente corretto, in quanto nel corso degli anni il progresso tecnologico ha portato allo sviluppo e all'implementazione di diversi livelli di automazione "GoA" (*Grade of Automation*) che via via hanno permesso il trasferimento delle responsabilità operative dal conducente ai vari sistemi di controllo-marcia treno.

Di seguito viene proposta una classificazione dei vari livelli di automazione presentata dall'*International Electrotechnical Commission* (IEC) [19]:

- GoA 1: corrisponde ad un funzionamento manuale del treno, in cui un macchinista controlla l'avviamento e l'arresto, l'apertura e chiusura delle porte in banchina e la gestione delle emergenze o delle improvvise deviazioni. La marcia del treno è controllata mediante automatismi di tipo puntuale (contatti e boe) che permettono al conducente di ricevere segnalazioni in punti prefissati del percorso. Il superamento della velocità massima ammessa all'interno di una sezione comporta l'arresto del convoglio;
- GoA 2: spesso indicato con la sigla "STO" (*Semi-Automatic Train Operation*), tale livello di automazione necessita della presenza di un conducente che è responsabile della partenza dei treni in tutta sicurezza all'interno delle stazioni. Inoltre il conducente si occupa dell'apertura e chiusura delle porte, comunica con i passeggeri e interviene arrestando il treno in caso di pericolo. L'accelerazione e la frenata del convoglio sono automatizzate, come le operazioni relative all'arrivo e partenza nelle stazioni. La velocità è costantemente tenuta sotto controllo dal sistema ATP (*Automatic Train Protection*) che garantisce la sicurezza del convoglio lungo tutta la linea;
- GoA 3: comunemente indicato con la sigla "DTO" (*Driverless Train Operation*), tale grado di automazione non necessita della presenza in cabina di un conducente. Tutte le operazioni inerenti l'avviamento e la fermata dei treni in banchina, l'accelerazione e la frenata sono effettuate dall'ATO (*Automatic Train Operation*), secondo diagrammi di trazione predeterminati, sotto l'incessante supervisione dell'ATP.

Nonostante la presenza di tutti gli automatismi che assicurano la marcia del treno in totale sicurezza, tale livello di automazione necessita della presenza di personale a bordo, a cui spetta il compito principale di apertura e chiusura porte all'interno delle stazioni, e di guida del treno in caso di emergenza;

- GoA 4: frequentemente denotato con l'acronimo "UTO" (*Unattended Train Operation*), è il più recente, sviluppato e affidabile livello di automazione presente in commercio. Tale sistema, non prevede la presenza di personale a bordo del treno e tutte le operazioni inerenti l'arrivo-fermata del treno in banchina, accelerazione-frenata, apertura chiusura porte e gestione delle emergenze sono coordinate in maniera automatica dagli appositi sistemi ATO ATP, sotto supervisione dell'ATS (*Automatic Train Supervisor*).

Grade of Automation	Type of train operation	Setting train in motion	Stopping train	Door closure	Operation in event of Disruption
GoA 1 	ATP with driver	Driver	Driver	Driver	Driver
GoA 2 	ATP and ATO with driver	Automatic	Automatic	Driver	Driver
GoA 3 	Driverless	Automatic	Automatic	Train attendant	Train attendant
GoA 4 	UTO	Automatic	Automatic	Automatic	Automatic

ATP - Automatic Train Protection ATO - Automatic Train Operation

Figura 35: Differenti livelli di automazione [5]

Oltre ai sopracitati sottosistemi sperimentati ATO ATP ATS, è necessario prevedere un impianto di manovra automatica ai capolinea, il soccorso dei treni in linea con comandi a distanza, apertura-chiusura a distanza porte, controllo e comando a distanza degli impianti ausiliari (impianti di ventilazione, luce, scale mobili, ecc.), sistemi di vendita automatica dei *tickets* di viaggio, nonché il controllo della sicurezza nella salita e discesa degli utenti.

3. Presentazione e sviluppo caso studio

3.1. Linea *Hastane-Soyak*

Dopo un'attenta e accurata revisione di tutti gli aspetti che contraddistinguono un sistema di trasporto metropolitano ad automazione integrale (livelli di automazione, segnalamento, consumi energetici, costi ecc.), di seguito viene presentata un'applicazione dei servizi di impiego di tale tipologia di trasporto collettivo su una linea in costruzione appartenente alla città di Istanbul, al fine di verificarne la fattibilità di progettazione e l'identificazione dei parametri prestazionali principali in differenti condizioni di esercizio. A tal proposito, è stato effettuato uno studio accurato ed approfondito sulle varie fasi del moto caratterizzanti un sistema metropolitano ad automazione integrale, focalizzando l'attenzione sulla fase di *coasting* (fase in cui il veicolo procede per inerzia) e ricercando la condizione ottimale tale per cui, fissate determinate condizioni al contorno, risulta possibile pervenire ad una ottimizzazione del rapporto consumi/prestazioni. Numerosi processi di simulazione sono stati necessari per lo sviluppo e per l'analisi accurata dei vari parametri prestazionali e dei consumi energetici caratterizzanti la linea in esame. La simulazione microscopica rappresenta il metodo più accurato per riprodurre le operazioni ferroviarie, poiché utilizza un modello molto preciso di infrastruttura, segnalamento e sistema di controllo dei treni e considera il movimento di questi ultimi sulla base di un gran numero di variabili. Al fine di ottenere risultati caratterizzati da un elevato grado di precisione, i vari processi di simulazione sono stati eseguiti mediante l'ausilio del software "Opentrack", il quale è stato progettato per l'analisi dinamica delle operazioni ferroviarie in tutti i suoi aspetti. Una volta implementata l'infrastruttura sul software a partire dai dati relativi al tracciato plano-altimetrico, definite le caratteristiche inerenti il materiale rotabile (sede viaria, treni, ecc.), impostato l'impianto di segnalamento da utilizzare e l'*headway* (distanziamento minimo temporale), è stato possibile pervenire agli output ottenuti dai vari processi di simulazione condotti in differenti condizioni di esercizio.

In particolar modo, tali output sono stati necessari per la valutazione dei seguenti parametri:

- individuazione del numero minimo di treni sulla linea in grado di operare ad intervalli regolari di 90 secondi;

- individuazione del numero dei treni indispensabili al fine di soddisfare la domanda di traffico stimata da “*Istanbul Metropolitan Municipality, Department of Transportation, Directorate of Transportation*”. Tali stime effettuate per il 2023 tengono conto dei valori di viaggio previsti per le ore di punta, e forniscono dati sulle caratteristiche del sistema ferroviario pianificato (frequenza del viaggio, capacità del veicolo, numeri dei veicoli da acquistare, ecc.);
- impatto sulle prestazioni e sui consumi energetici durante le operazioni condotte in “*Normal conditions*”;
- impatto sulle prestazioni e sui consumi energetici durante le operazioni condotte in “*Eco-Mode conditions*”. In modo particolare è stata ricercata la condizione ottimale tale per cui risulta possibile minimizzare i consumi e massimizzare le prestazioni in termini di livello di servizio offerto;
- circolazione ferroviaria in caso di “*Fail-System*”. È stato analizzato il comportamento della linea in seguito a guasti presenti nel materiale rotabile (treni, tratti di linea).

L’oggetto del caso studio in esame riguarda la linea “*Hastane-Soyak*” (Figura 36), lunga circa 9 km e costituita dalla presenza di 7 stazioni dislocate lungo il tracciato con un distanziamento medio di circa 1 km l’una dall’altra. Tale linea, è localizzata nella parte asiatica della città di Istanbul ed, espandendosi da est verso ovest, funge da collegamento tra la “*Cekmekoy – Tasdelen Line*” e la “*Ümraniye-Ataşehir-Göztepe Line*”. Questa zona negli ultimi anni è stata oggetto di una forte espansione demografica soprattutto dopo la costruzione della “*Sile Motorway*”, che ha portato alla costruzione di numerose zone residenziali ed alla creazione di nuovi posti di lavoro. L’incremento della popolazione in questa particolare regione, fino a poco tempo fa sprovvista dei più moderni e affidabili sistemi di trasporto pubblici, tuttavia ha comportato l’insorgere di significativi problemi, primo fra tutti la congestione del traffico veicolare. Per ovviare a tale problema ed avere un’alternativa al trasporto caratterizzato per lo più dai veicoli privati, numerose linee metropolitane constano essere in fase di progettazione, con il prefissato obiettivo di rappresentare a breve la spina dorsale del sistema di trasporto pubblico locale.



Figura 36: Linea *Hastane-Soyak*

3.2. Strumento di simulazione OpenTrack

OpenTrack è un software sviluppato al Politecnico Federale di Zurigo ed oggi usato da numerose università, società di consulenza e imprese leader nel settore dei trasporti. Tale software è in grado di analizzare modellizzare e simulare differenti tipi di sistemi di trasporto a guida vincolata, come ad esempio ferrovie ad alta velocità, ferrovie tradizionali, metropolitane, maglev, *people moover*, ecc. Il seguente software consente di svolgere numerose attività tra cui:

- progettazione delle peculiarità relative alle infrastrutture future
- analisi delle capacità di linea e dei nodi
- determinazione dell'*headway* minimo tra due veicoli successivi
- determinazione dei tempi di viaggio
- realizzazione di studi relativi il materiale rotabile
- impostazione e osservazione delle tabelle orarie di marcia
- analizzare differenti tipologie di sistemi di segnalamento, come blocco fisso/mobile

- valutazione degli effetti di guasti e ritardi
- studiare il consumo energetico dei treni

OpenTrack necessita di tre fonti di dati di input:

- schede tecniche relative al materiale rotabile (*Rolling Stock*)
- informazioni inerenti l'infrastruttura caratterizzate da un notevole grado di precisione
- tabelle orarie

La combinazione di questi tre input permette di definire uno scenario, e di conseguenza avviare il processo di simulazione nel quale i treni avanzano rispettando tutti gli orari impostati all'interno delle tabelle orarie e osservando i vincoli stabiliti dal sistema di segnalamento ferroviario. Le equazioni differenziali per la velocità e la distanza rappresentano la base per il calcolo dei movimenti di un treno, infatti durante il processo di simulazione ogni treno registra in maniera continua informazioni inerenti la velocità, l'accelerazione, consumi energetici, posizione, e tanti altri dati utili alla valutazione delle prestazioni di una linea. OpenTrack inoltre consente all'utente di osservare in modalità animata il processo di simulazione di esercizio dei treni, in modo tale da fornire ad esso una visione generale sulle tracce occupate, tracce riservate e aspetti del segnale.

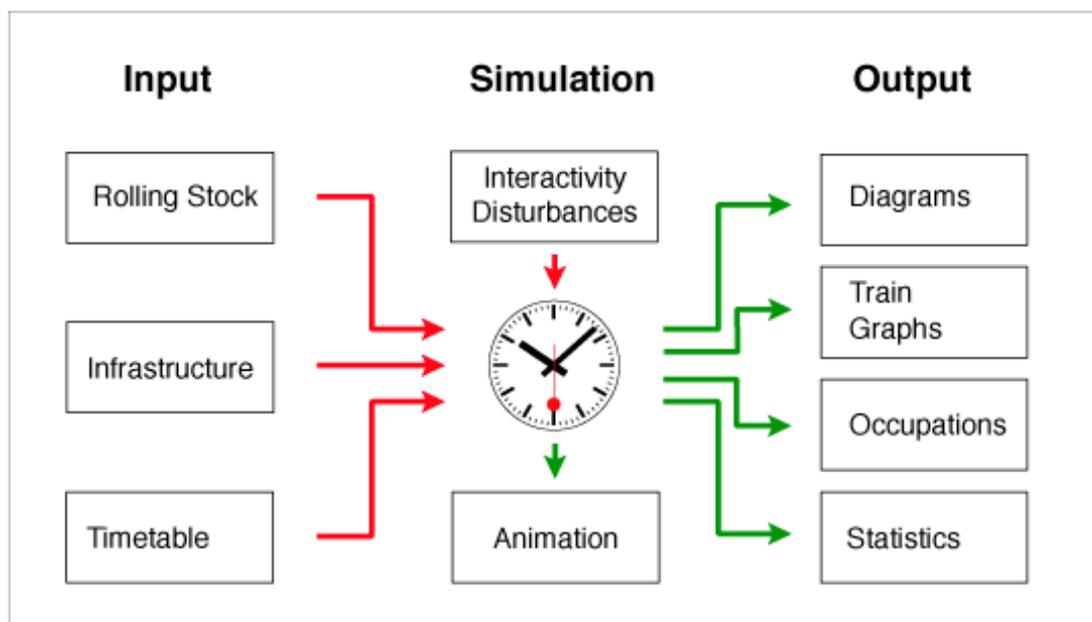


Figura 37: OpenTrack *simulation*: Input and Output [25]

Infrastruttura

In OpenTrack l'infrastruttura che rappresenta la rete ferroviaria viene realizzata attraverso uno specifico tipo di grafo comunemente indicato con il nome “*Double Vertex Graph*”, il quale consente di gestire in maniera semplificata i dati direzionali. Tramite l'uso di un editor grafico è possibile registrare graficamente il layout del tracciato. Mediante “*l'Inspector Tool*” invece, ai diversi elementi raffiguranti l'infrastruttura ferroviaria (archi, segnali, vertici, ecc.) vengono assegnate una serie di proprietà rappresentanti le principali caratteristiche del tracciato come ad esempio la lunghezza, la pendenza longitudinale, il limite di velocità in base al rango, ecc. Allo stesso modo, le informazioni inerenti il nome e la posizione possono essere inserite dall'utente mediante “*l'Inspector Vertex*”, come del resto le caratteristiche ed il funzionamento dei sistemi di blocco e sicurezza. In figura 38 viene riportato un esempio di layout di tracciato.

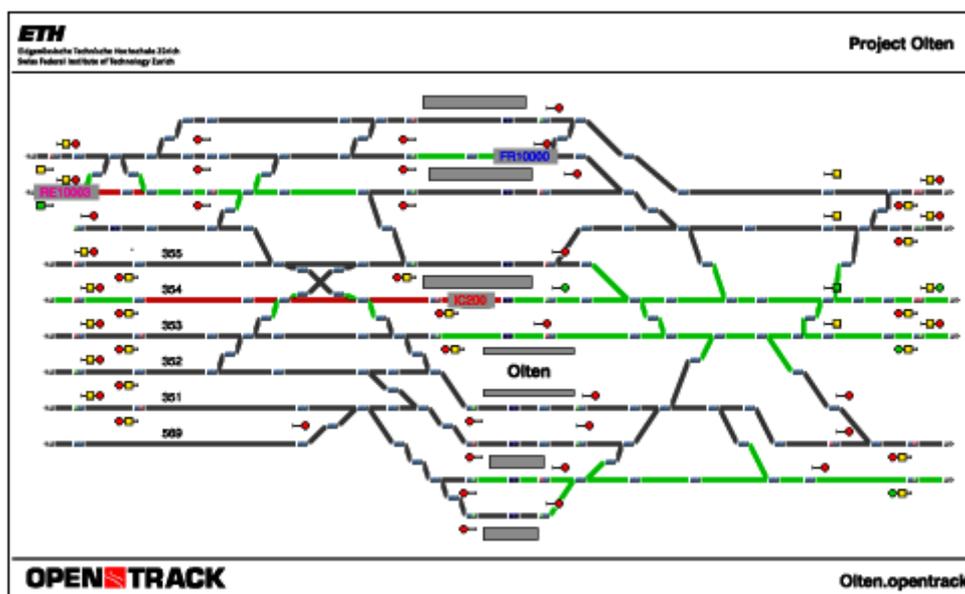


Figura 38: Esempio Layout di tracciato OpenTrack [25]

Rolling stock

Il materiale rotabile è costituito da veicoli motorizzati e veicoli trainati che, combinati tra loro, danno origine ad un treno. OpenTrack all'interno di un database chiamato “*Detop*”, memorizza tutte le specifiche tecniche relative ai veicoli motorizzati, come ad esempio la

caratteristica meccanica di trazione, la massa, il peso aderente, la lunghezza, ecc.; l'utente a sua volta può decidere se utilizzare veicoli motorizzati predefiniti caratterizzati da determinate caratteristiche tecniche e collocati all'interno del database, oppure inserire nuovi dati per veicoli specifici. I veicoli trainati invece non sono presenti nel *Detop*, in quanto sono funzione solo della lunghezza e del carico totale trasportato.



Figura 39: Gestione del materiale rotabile in OpenTrack [25]

Tabelle orarie

I dati relativi agli orari dei treni sono contenuti all'interno di un altro database. Tali dati includono informazioni relative all'orario di partenza dei treni, orario di arrivo e transito, tempi di sosta minimi alle fermate e coincidenze con altri servizi. OpenTrack inoltre fornisce all'utente la possibilità di intervenire sui dati relativi agli orari attraverso una tabella specifica, oppure direttamente dall'orario grafico (*Train Diagram*).

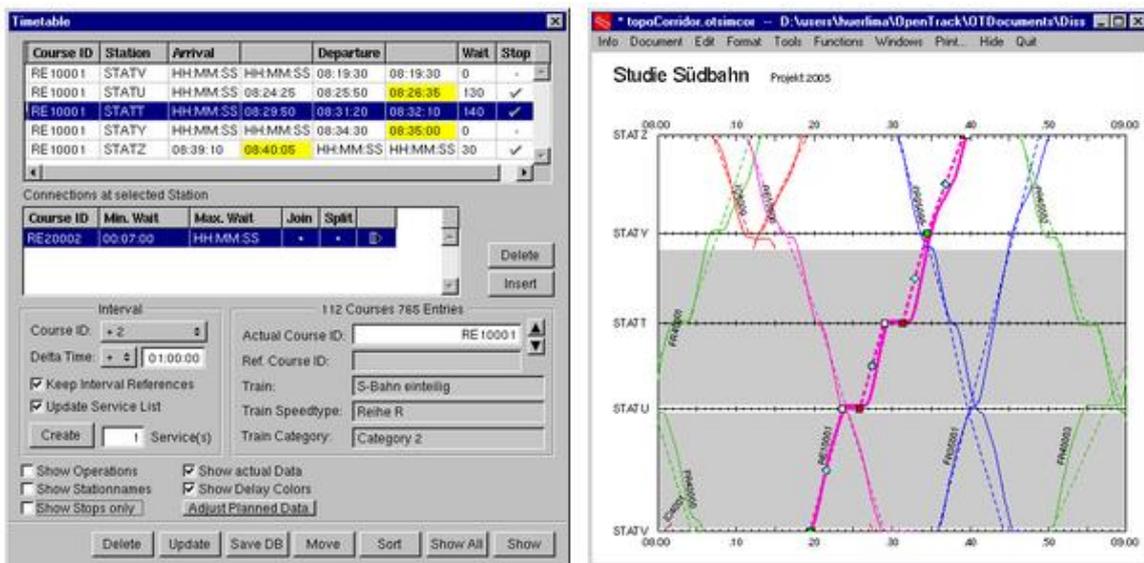


Figura 40: Timetable Opentrack [25]

3.3 Infrastruttura e sistema di segnalamento della linea *Hastane-Soyak*

L'infrastruttura ferroviaria relativa alla linea *Hastane-Soyak* è stata creata a partire dai dati di progetto inerenti il tracciato plano-altimetrico. Tale linea, caratterizzata da una lunghezza di circa di 9 km, presenta al suo interno 7 stazioni distanti in media 1,1 km l'una dall'altra; la lunghezza delle banchine appartenenti ad ogni stazione risulta essere invece di 100m compatibilmente alla lunghezza di ogni singolo convoglio ferroviario, il quale consta essere lungo 90m. Sono previste inoltre due intersezioni con altrettante linee metropolitane; nello specifico, la stazione di “*Imes*” (Station 3) si interseca con la “*Dudullu-Bostanci Line*”, mentre la stazione di “*Soyak*” si interseca con la “*Ümraniye-Ataşehir-Göztepe Line*”. Dai dati relativi al tracciato altimetrico è possibile notare che la linea in esame raggiunge un picco massimo di pendenza del 40 ‰, mentre quella media risulta essere del 4.4 ‰. Viceversa dai dati di progetto inerenti al tracciato planimetrico, si evince la presenza di 12 curve lungo il tracciato contraddistinte da un raggio minimo di 300m e da uno massimo di 1254m. Lungo tale linea inoltre vi è la presenza di 4 *switch* (scambi) di lunghezza variabile tra i 120-165m i quali offrono la possibilità ai treni di scambi bidirezionali qualora si verificassero eventuali guasti lungo il tracciato; inoltre una zona di ricovero dei treni è prevista al capolinea della stazione *Soyak*. Il sistema di controllo treno utilizzato è il sistema “*CBTC*” (*Communication Based Train Control*), il quale grazie ad uno scambio di informazioni bidirezionale via radio-wifi è in grado di garantire un distanziamento temporale minimo tra convogli successivi di 90 secondi (migliorabile) ed in completa sicurezza. Di seguito viene proposto il diagramma *gradient/distance* relativo alla linea *Hastane-Soyak* (Figura 41), mentre in figura 42 viene presentato il layout dell'infrastruttura implementato sul software OpenTrack.

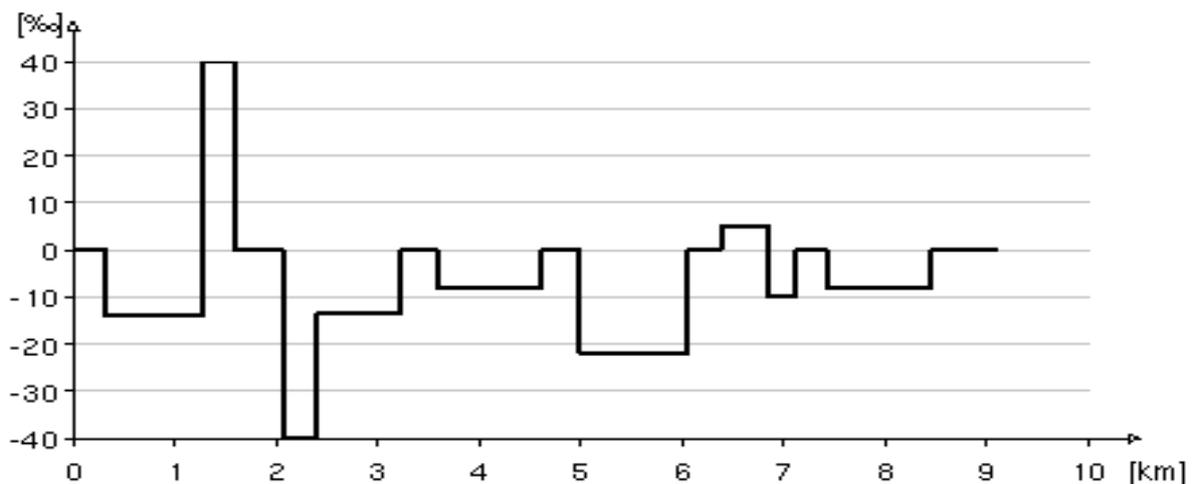


Figura 41: Diagramma *gradient/distance* linea *Hastane-Soyak*

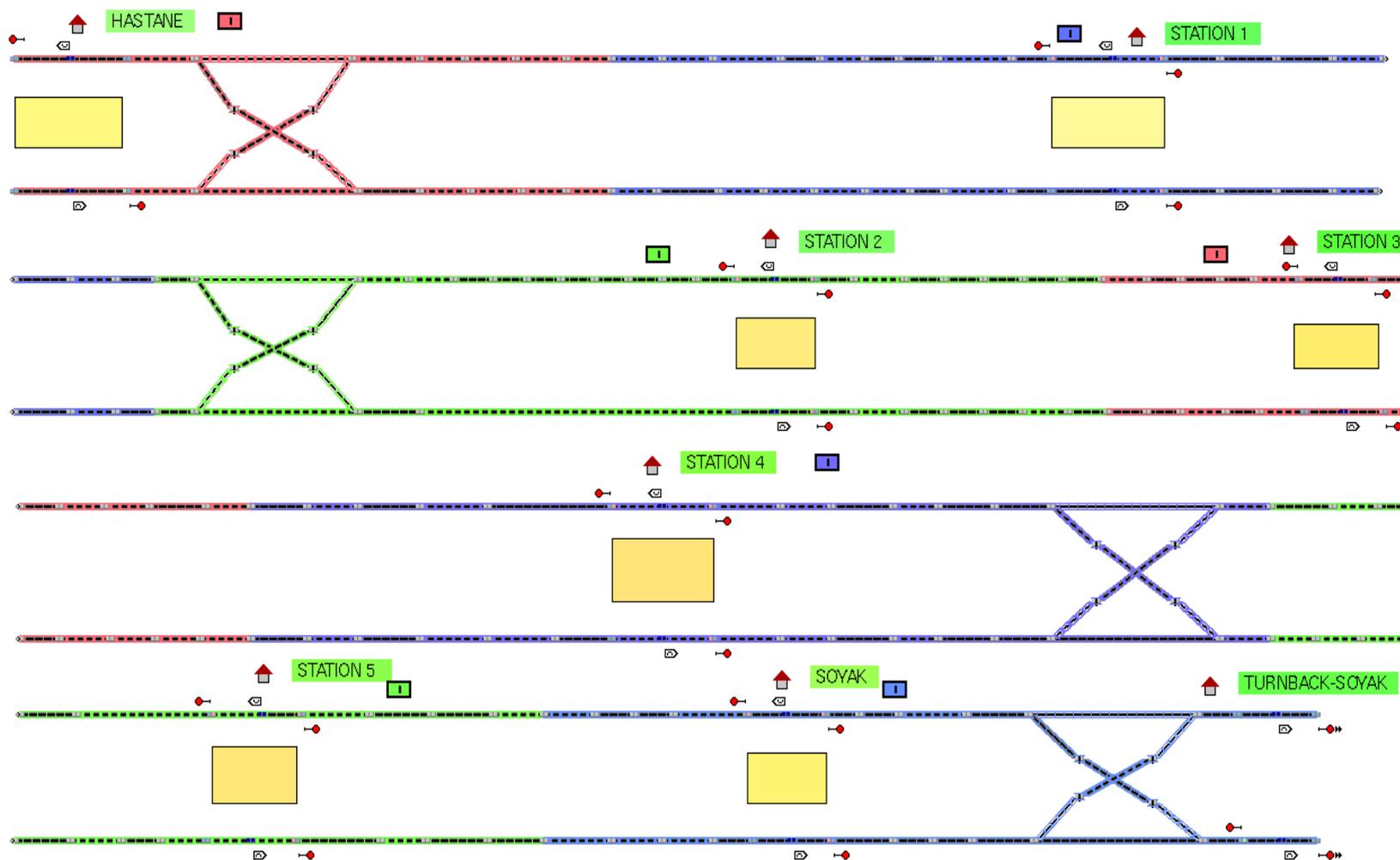


Figura 42: Layout tracciato linea *Hastane-Soyak*

3.4 Materiale rotabile

Attraverso i dati di progetto relativi al materiale rotabile è stato possibile modellizzare i treni sul software Opentrack al fine di eseguire i vari processi di simulazione. Di seguito in formato tabellare vengono riportate le informazioni principali relative ai treni e alle loro caratteristiche tecniche, come ad esempio il numero di veicoli usati per la composizione di un treno, il peso aderente, informazioni inerenti la massa, la lunghezza, la capacità, la velocità massima, la potenza, ecc.

Caratteristiche Principali Materiale Rotabile		
Composizione del treno	4	veicoli/treno
Numero di veicoli motorizzati	3	veicoli motorizzati/treno
Numero di veicoli trainati	1	veicoli trainati/treno
Numero di motori	4	motori/veicoli motorizzati
Numero Totale di motori	12	motori/treno
Lunghezza singolo veicolo	22,5	m/veicolo
Lunghezza totale del treno	90	m/treno
Decelerazione massima	1,1	m/s ²
Accelerazione massima	1,1	m/s ²
Velocità massima	80	km/h
Peso per asse	15,5	tonnellate
Peso totale del treno a pieno carico (AW4)	135	tonnellate/treno
Peso totale del treno senza carico a bordo	248	tonnellate/treno
Capacità passeggeri (AW4)	1608	passeggeri/treno
Potenza totale di trazione	2160	kW/treno
Potenza ausiliaria	320	kW/treno
Voltaggio nominale	1500	V
Efficienza motore elettrico	0,92	%
Fattore dinamico di massa	0,1	-

Tabella 6: Principali caratteristiche materiale rotabile

Una volta note le informazioni sul materiale rotabile è stato possibile definire dapprima su Excel e dopo su OpenTrack la caratteristica meccanica di trazione (sforzo di trazione/profilo di velocità) dei singoli veicoli motorizzati (Figura 43).

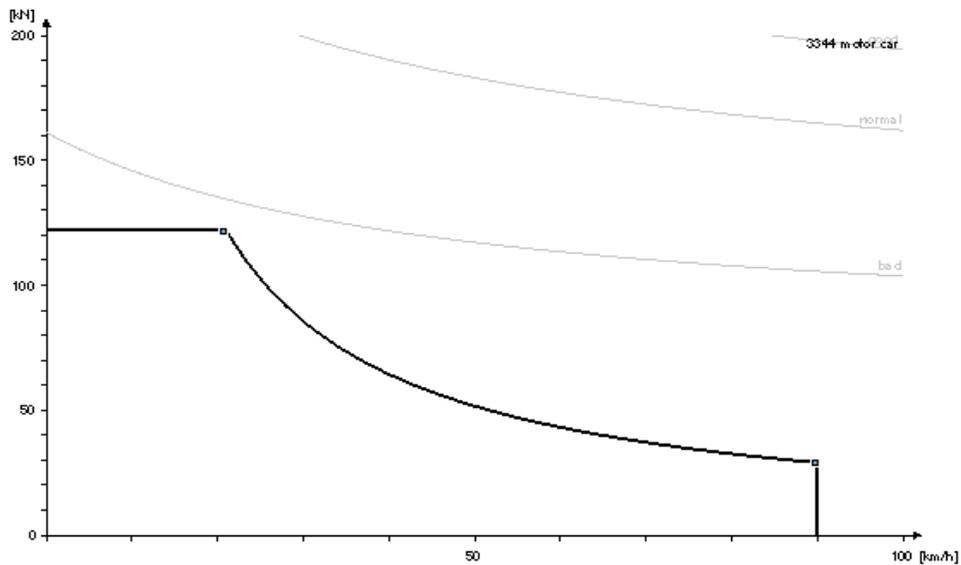


Figura 43: Sforzo di trazione / profilo di velocità di un singolo veicolo motorizzato

Definiti i parametri caratterizzanti la motorizzazione dei singoli veicoli, lo *step* successivo consiste nell'assemblaggio dei treni su OpenTrack (Figura 44) e nella scelta delle formule da utilizzare ai fini del calcolo relativo al/alle:

- coefficiente di aderenza
- resistenze ordinarie
- resistenze in curva
- resistenze aerodinamica in galleria
- resistenze di livelletta
- resistenze di inerzia

Train Name: Default

Type:

Category:

Engines

Pos.	Name	Load [t]	Len. [m]
1	3344 motor car	62	22
2	3344 motor car	62	22

Σ Load [t]: Σ Len. [m]:

Trailers

Pos.	Name	Load [t]	Len. [m]
3	Trailer 1	62	22

Σ Load [t]: Σ Len. [m]:

Resistance Equation

Rolling:

A: B: C: Unit:

Starting Res. [N/t]: below Speed [km/h]:

Curve: [%]:

Acceleration (Train related Settings)

Max. Acceleration [m/s^2]: Max. Drawbar Force [kN]:

Acc. Delay [s]: Min. Time to hold Speed [s]:

Deceleration

Deceleration Function:

From [km/h]	To [km/h]	Dec. [m/s^2]	Dec. St. [m/s/s]
0	v max.	-1.10	-0.10

Braked Weight Percentage (BWP) [%]:

a = -(C1+C2*BWP) C1: C2: Result [m/s^2]:

Correct Deceleration on Gradients [m/s^2/‰]

Min. Dec. [m/s^2]: Max. [m/s^2]:

 Dec. Delay [s]: above [km/h]:

Figura 44: Impostazioni dei dati relativi ai treni in OpenTrack

- Per il calcolo del coefficiente di aderenza “ μ ” è stata utilizza la formula empirica di “*Curtius and Kniffer*” che descrive il comportamento di attrito tra ruota e rotaia in modo dipendente dalla velocità:

$$\mu = \frac{2,1 \text{ m/s}}{v + 12,2 \text{ m/s}} + 0,161$$

μ : Friction Coefficient
 v : Speed

$[\mu] = 1$
 $[v] = \text{m/s}$

- Le resistenze ordinarie sono state calcolate attraverso la “*Davis Formula*”:

$$r' = A + B \cdot v + C \cdot v^2$$

$$R_{LZ} = m \cdot g \cdot r' / 1000$$

R_{LZ} :	Train air resistance	$[R_{LZ}] = N$
r' :	Special air resistance	$[r'] = N/kN$
g :	Acceleration due to gravity (9.81 m/s ²)	$[g] = m/s^2$
m :	Weight of wagons	$[m] = kg$
v :	Train Speed	$[v] = km/h$

- Le resistenze in curva dipendono dal raggio e dallo scartamento e vengono calcolate da OpenTrack mediante la “*Roeckl's Formula*”:

$$R_B = \frac{1+c}{r} \cdot 0,17 \cdot m \cdot g$$

R_B :	Curve resistance	$[R_B] = N$
c :	Distance of axles per bogie $[c] = m$	$(c = 2m)$
r :	Curve radius	$[r] = m$
m :	Train weight (mass)	$[m] = kg$
g :	Acceleration due to gravity	$[g] = m/s^2$

- La resistenza aerodinamica in galleria viene calcolata tramite la seguente formula:

$$R_T = f_T \cdot v^2$$

R_T :	Tunnel resistance	$[R_T] = N$
f_T :	Tunnel factor	$[f_T] = kg/m$
v :	Speed	$[v] = m/s$

- La resistenza di livelletta è funzione della massa e dell'angolo di inclinazione e dell'accelerazione di gravità e viene calcolata tramite la seguente formula:

$$R_s = m \cdot g \cdot \sin(\alpha)$$

$$R_s = m \cdot g \cdot \tan(\alpha) = m \cdot g \cdot \frac{I}{1000} \quad \begin{array}{l} \text{für kleine } \alpha \\ \text{for small } \alpha \end{array}$$

R_s :	Gradient resistance	$[R_s] = N$
m :	Train weight (mass)	$[m] = kg$
g :	Acceleration due to gravity	$[g] = m/s^2$
α :	Angle of inclination	$[\alpha] = ^\circ \text{ oder rad}$
I :	Upward gradient (slope)	$[I] = \text{‰}$

- La resistenza di inerzia è proporzionale alla massa del treno e alla sua velocità di accelerazione. Tale resistenza tiene conto anche delle masse rotanti tramite un fattore di massa empirico ρ ; essa viene calcolata mediante la seguente formula:

$$R_a = m \cdot a \cdot (1 + 0,01 \cdot \rho)$$

R_a :	Acceleration resistance	$[R_a] = N$
m :	Train weight (mass)	$[m] = kg$
a :	Acceleration rate	$[a] = m/s^2$
ρ :	Empirical mass factor	$[\rho] = 1$

Nella figure sottostanti vengono riportati i diagrammi resistenza / distanza relative ad entrambe le direzioni della linea *Hastane-Soyak*:

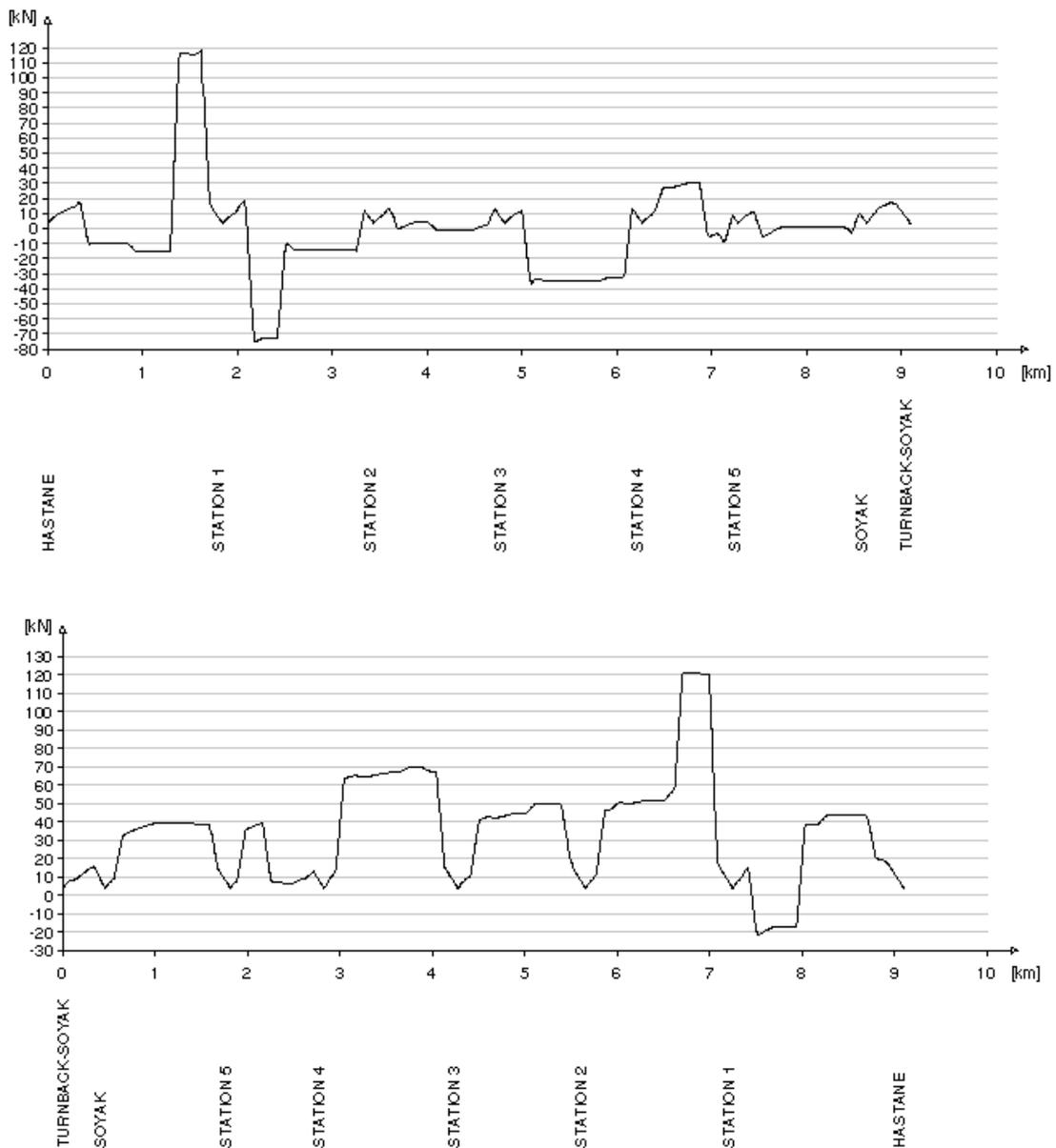


Figura 45: Diagrammi resistenza / distanza linea *Hastane Soyak – Soyak Hastane*

3.5. Tabelle orarie

Nei vari processi di simulazione che si sono susseguiti è stato considerato un distanziamento minimo temporale pari a 90 secondi (*headway*) ed un tempo di sosta minimo alle stazioni dislocate lungo la linea pari a 20 secondi. Tali processi di simulazione sono stati eseguiti riducendo le prestazioni di esercizio relative alla marcia dei treni al 95% del massimo consentito, tenendo conto del fatto che il treno non è in grado di sfruttare pienamente le proprie prestazioni in condizioni operative, specialmente in fase di accelerazione e decelerazione. Infatti la massima accelerazione non viene raggiunta istantaneamente alla partenza, come del resto la fase di decelerazione e frenata; inoltre quest'ultima fase comprende un movimento minimo del treno che gli permette di raggiungere l'esatta posizione di arresto in banchina affinché le porte dei vari veicoli risultino perfettamente allineate con le porte della piattaforma (*screen doors*). Considerando quindi tale riduzione ne risulta che le prestazioni globali dei treni risultano essere leggermente inferiori (circa 4-6%) rispetto a quanto teoricamente possibile e, di conseguenza, non si perviene ad una sottostima del tempo di viaggio. Una riduzione percentuale del 95 % rispetto al massimo consentito quindi sembra essere abbastanza ragionevole e trova largo impiego in molti progetti simili a quello in esame. Di seguito (Tabella 7) viene riportata la tabella oraria (*Timetable*) relativa alla linea *Hastane-Soyak* ottenuta durante una simulazione eseguita in "Normal conditions".

STATION	ARRIVAL	DEPARTURE	DWELL	TIME
HASTANE	07:59:40	08:00:00	20''	-
STATION 1	08:01:52	08:02:12	20''	00:01:52
STATION 2	08:03:51	08:04:11	20''	00:01:39
STATION 3	08:05:40	08:06:00	20''	00:01:29
STATION 4	08:07:32	08:07:52	20''	00:01:32
STATION 5	08:09:04	08:09:24	20''	00:01:12
SOYAK	08:10:52	08:11:12	20''	00:01:28
TURNBACK SOYAK	08:11:57	08:12:17	20''	00:00:45

Tabella 7: *Timetable* itinerario 1 linea *Hastane-Soyak*

3.6. Analisi relativa alla fase di *Coasting*

Come riportato nel capitolo precedente (capitolo 2) la fase di *Coasting*, ovvero quella fase in cui viene sfruttata la bassa resistenza al rotolamento facendo procedere il veicolo per inerzia, è una fase del moto tipica dei sistemi su rotaia. Tale fase del moto deve essere scelta e valutata con particolare cura ed attenzione, in quanto a fronte di un piccolo incremento temporale di percorrenza della tratta dovuto ad una leggera riduzione della velocità di marcia è possibile ottenere ingenti guadagni energetici e recuperi temporali in caso di eventuali ritardi (figura 46).

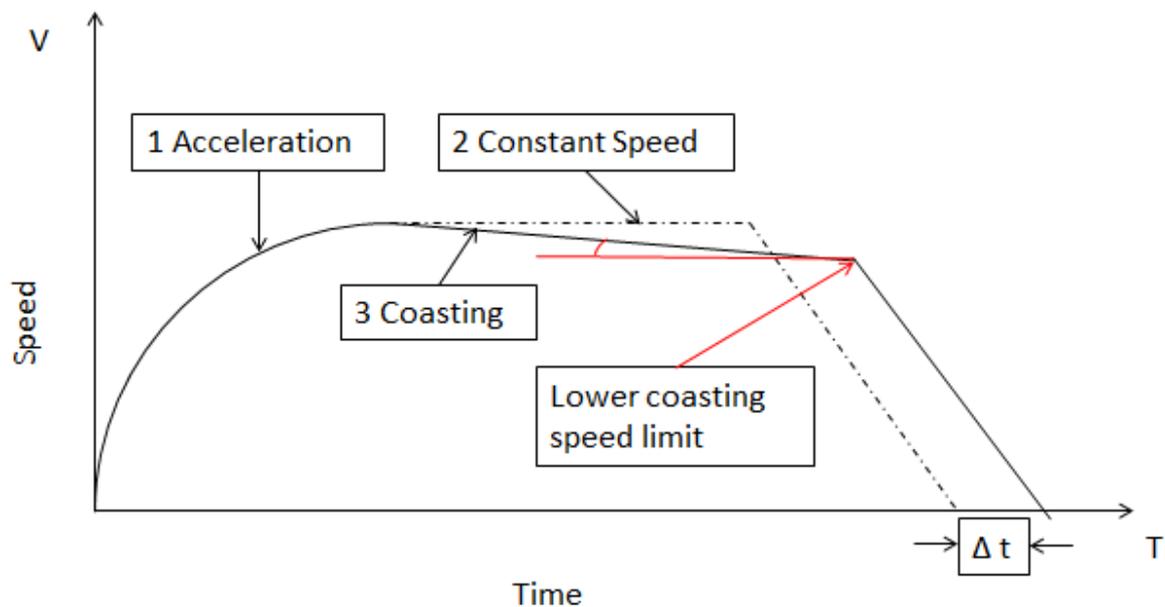


Figura 46: Diagramma fase di *coasting*

Il tempo impiegato dai vari convogli nel percorrere una tratta tra stazioni successive non deve essere abbastanza elevato, in modo tale da non pregiudicare la velocità commerciale e di conseguenza il livello di servizio offerto. Ciò significherebbe dover prevedere un numero maggiore di veicoli da inserire all'interno della linea comportando in questa maniera un aumento del costo globale dell'intero sistema. A tal proposito in questo elaborato di tesi è stato effettuato uno studio relativo alla fase di *coasting* avente per oggetto la ricerca della condizione di esercizio ottimale in grado di garantire minori consumi energetici e massime prestazioni in termini di livello di servizio offerto; di conseguenza il diagramma di trazione può essere programmato in maniera molto accurata e precisa affinché il rapporto consumi/prestazioni risulti ottimizzato.

Implementata l'infrastruttura sul software OpenTrack a partire dai dati relativi al tracciato plano-altimetrico, definite le caratteristiche inerenti il materiale rotabile e impostato l'*headway* (distanziamento minimo temporale), è stato possibile effettuare una simulazione di esercizio in "*Normal conditions*" in modo tale da pervenire all'individuazione del numero dei treni indispensabili a soddisfare la domanda di traffico stimata dalla "*Istanbul Metropolitan Municipality, Department of Transportation, Directorate of Transportation*" prevista per le ore di punta, rappresentanti le massime prestazioni del sistema metropolitano. Una volta fissato questo parametro, sulla linea in esame, sono state effettuate diverse simulazioni di esercizio in "*Eco-mode-conditions*" per diversi limiti inferiori di velocità relativi alla fase di *coasting* (tratto rosso figura), in modo tale da individuare la condizione in grado di minimizzare i consumi energetici senza pregiudicare le prestazioni. Questo limite inferiore di velocità individua l'istante in cui il veicolo non procede più per inerzia, ma prosegue seguendo la fase di frenatura, oppure attraverso una nuova fase di accelerazione (*power on*) funzione del profilo plano-altimetrico del tracciato e delle resistenze a cui è soggetto il convoglio durante la propria marcia. Per quanto concerne il limite superiore di velocità invece, come si evince dal grafico rappresentato in precedenza (figura 46), esso coincide sempre con la velocità massima raggiunta dal convoglio durante la condizione di marcia ideale pari a 80 km/h. In seguito ai processi di simulazione eseguiti mediante il software OpenTrack è stato possibile pervenire a diversi output raffiguranti le prestazioni dei vari convogli lungo la linea in esame. Nei grafici sottostanti vengono riportati i diagrammi *tempo-spazio* (figura 47 e 48) e *velocità-tempo* (figura 49) per entrambe le direzioni di marcia della linea raffiguranti le varie simulazioni di esercizio condotte per diversi limiti inferiori di velocità rapportate con la simulazione eseguita in "*Normal conditions*". Da questi grafici è possibile notare come la fase in cui il veicolo procede per inerzia (*power off*) risulta più marcata e presente nella tratta "*Soyak-Hastane*", in quanto questa presenta un profilo altimetrico caratterizzato per lo più da tratte a gradiente positivo, cosa che risulta meno evidente per la tratta opposta, ovvero "*Hastane-Soyak*" contraddistinta da lunghi tratti a pendenza negativa. Il limite inferiore di velocità di *coasting* e il tempo necessario ai convogli a percorrere l'intera tratta, risultano essere inversamente proporzionali; infatti all'aumentare del primo fattore diminuisce il tempo di corsa, che risulta essere sempre di più vicino alle prestazioni conseguite dalla simulazione effettuata in "*Normal conditions*". Dal diagramma *tempo-spazio* relativo alla tratta "*Hastane-Soyak*" (figura 47 caso a) è possibile invece notare come oltre alla curva raffigurante le massime prestazioni, le uniche curve presenti siano quelle caratterizzate da un limite di velocità di *coasting* pari a 45 km/h e 55km/h. Questo

perché il tempo necessario a percorrere l'intera tratta da parte del convoglio che presenta un limite di velocità pari a 45 km/h consta essere uguale per tutte i treni caratterizzati da limiti di velocità inferiori a 45 km/h (vedi risultati capitolo successivo). Identico discorso vale per le curve pari a 55km/h e 50km/h. Tale situazione non si verifica invece nella tratta opposta, in cui bisogna prestare massima attenzione a non eccedere con i tempi in quanto è possibile compromettere la velocità commerciale e di conseguenza il livello di servizio offerto.

La ricerca della condizione di *coasting* ottimale non può basarsi solo ed esclusivamente sulle prestazioni (tempi di corsa, velocità commerciale, numero di treni) conseguite dai vari convogli lungo la loro marcia, ma deve essere associata ad uno studio per la valutazione dei consumi energetici a partire dai valori inerenti la potenza assorbita da ciascun treno e la posizione assunta da esso lungo tutta la linea, calcolata secondo per secondo. In seguito ad un processo di simulazione elettrica eseguito per tutte le simulazioni di esercizio relative ai diversi limiti di velocità sviluppato in Excel, è stato possibile rinvenire dapprima al consumo di potenza meccanica dei singoli treni e successivamente (vedi paragrafo successivo) alla potenza elettrica erogata dalle sottostazioni elettriche dislocate lungo la linea, necessaria all'alimentazione dei vari convogli.

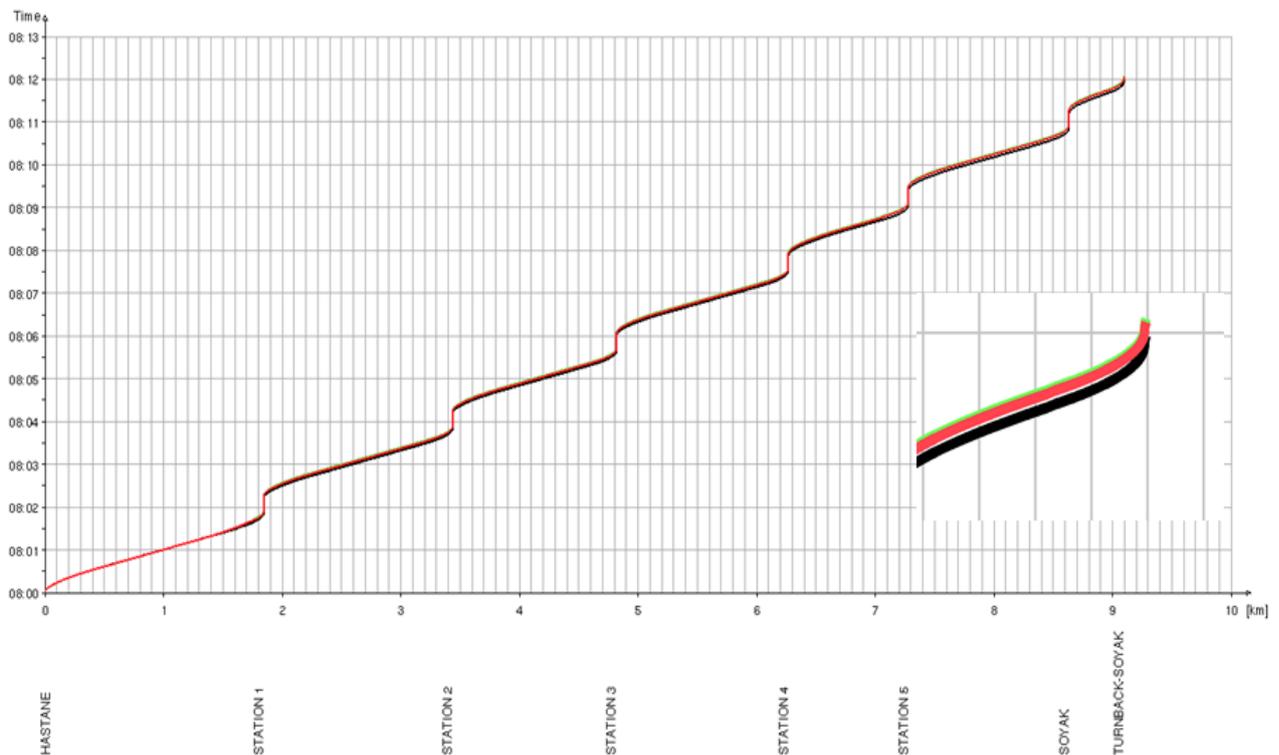
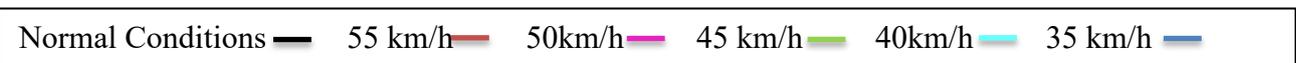


Figura 47: Diagramma tempo-spazio (caso a)

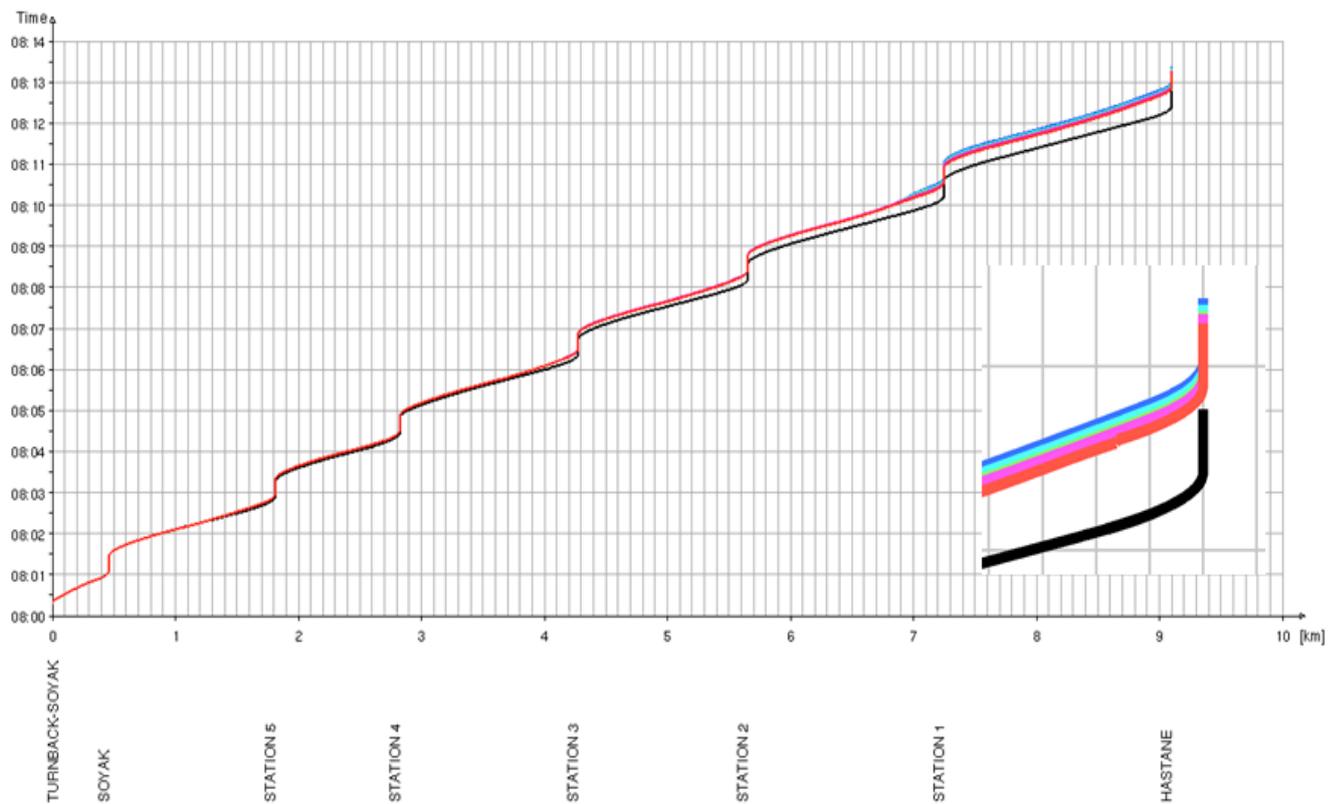


Figura 48: Diagramma tempo-spazio (caso b)

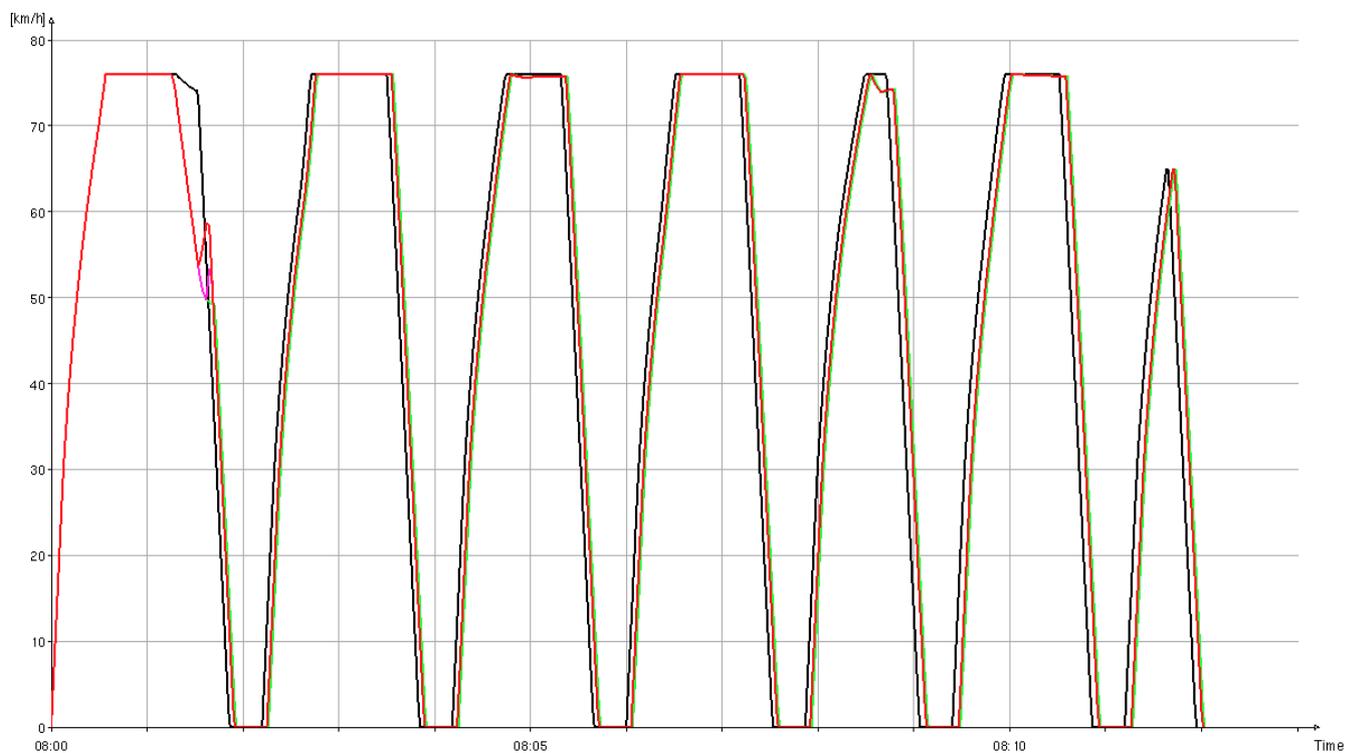


Figura 49: Diagramma velocità-tempo (caso a)

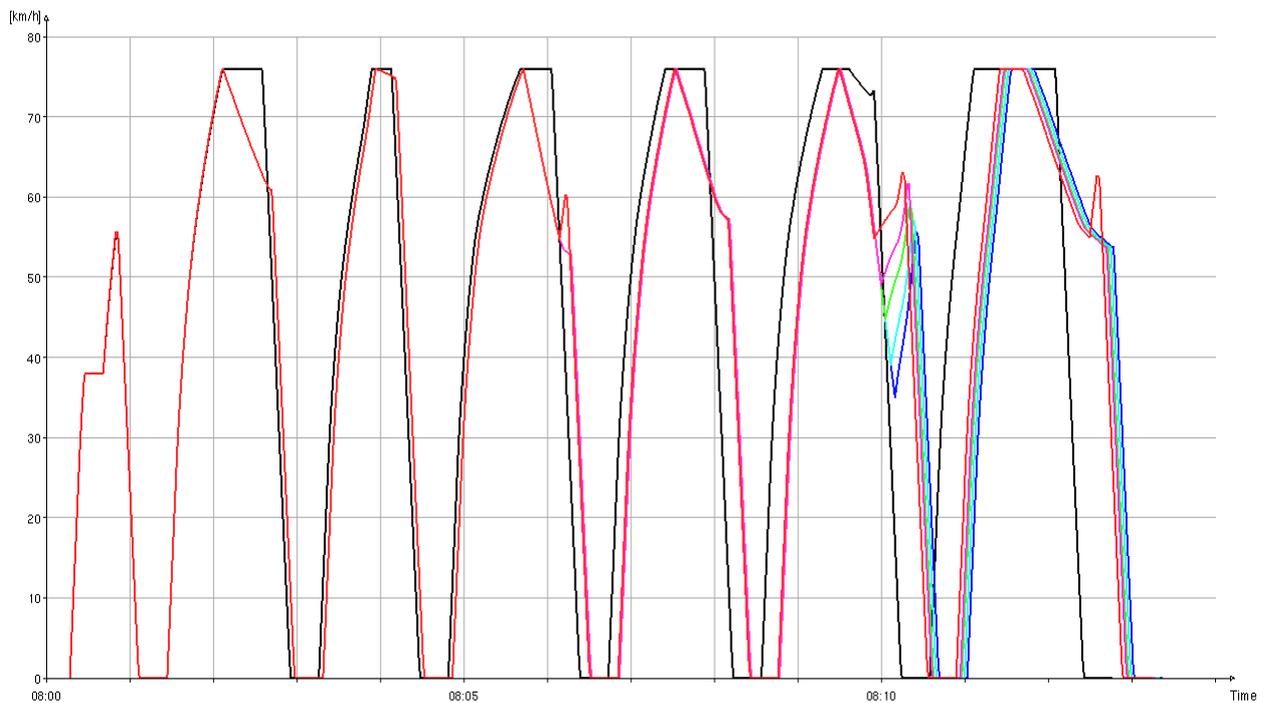


Figura 50: Diagramma velocità-tempo (caso b)

3.7. Metodologia di calcolo e di valutazione dei dati energetici

Sulla linea in esame è stato eseguito anche uno studio per la valutazione dei consumi energetici a partire dai valori inerenti alla potenza assorbita da ciascun treno e alla posizione assunta da esso lungo tutta la linea, calcolata secondo per secondo. Dall'integrazione di questi output ottenuti dai vari processi di simulazione con un modello di infrastruttura elettrica e con le caratteristiche delle varie sottostazioni di energia disposte lungo la linea, sebbene il software OpenTrack non calcola il consumo energetico a livello di rete, è stato possibile rinvenire il consumo di potenza meccanica dei singoli treni. Nonostante tale limite, da un accurata revisione della letteratura di settore, sono stati reperiti diversi metodi sulla conversione di potenza meccanica in energia elettrica al pantografo; in questo caso specifico, si è fatto riferimento per i calcoli agli "EMU" (*Electric Multiple Unit*), ovvero treni a più unità composto da carrelli semoventi che utilizzano l'elettricità come forza motrice, caratterizzati da una rapida accelerazione e bassissimi livelli di inquinamento. Tali "EMU" sono contraddistinti da un'efficienza di circa il 92% durante l'accelerazione, un'efficienza di circa il 30% durante la frenata rigenerativa e un consumo costante di 320 kW necessari al

funzionamento dei servizi a bordo dei veicoli (luci, climatizzazione, compressore dei freni, ecc.).

L'energia totale consumata da un treno durante la sua marcia, viene calcolata utilizzando la seguente formula:

$$E = \frac{\int Fvdt}{\eta_M} + At + \eta_B \int Bvdt$$

Con il primo termine viene indicata la potenza elettrica necessaria al treno nella fase di trazione, infatti F rappresenta lo sforzo di trazione, v la velocità di marcia in un determinato istante e η_M il fattore moltiplicativo necessario alla conversione della potenza elettrica in potenza meccanica; il secondo termine tiene conto della potenza ausiliare fornita ad ogni treno necessaria per il funzionamento dei servizi di bordo (luce, aria condizionata, impianto acustico); nell'ultimo termine invece dal prodotto tra lo sforzo di frenatura B , la velocità v e il fattore moltiplicativo η_B (fattore in grado di convertire energia meccanica in elettrica), si perviene all'energia elettrica nella fase di frenatura. Il calcolo della fase rigenerativa (terza parte della formula soprastante) inizia una volta terminata la fase di *coasting* e termina quando il convoglio ferroviario raggiunge una velocità di marcia pari a 10 km/h; successivamente subentra la frenata meccanica fino all'arresto del veicolo in banchina. Al di sotto dei 10 km/h infatti la quantità di energia recuperata è minima se non nulla e quella lievissima parte recuperata di solito viene dispersa in calore per effetto Joule. La risoluzione di tali integrali è avvenuta mediante l'ausilio della "regola dei trapezi" o regola di Stevino. Tale regola, fornisce un procedimento per il calcolo approssimato di un integrale definito della forma $\int_a^b f(x)dx$. Nella sua formulazione elementare, la regola dei trapezi propone di approssimare l'integrale, cioè l'area della regione piana compresa fra il grafo della funzione $f(x)$ e l'asse delle ascisse, con l'area del trapezio di vertici $(a,f(a))$, $(b,f(b))$, $(b,0)$ e $(a,0)$. Di conseguenza:

$$\int_a^b f(x) dx \approx (b - a) \frac{f(a) + f(b)}{2}$$

La catenaria, come nella grande maggioranza delle linee di recente costruzione, è costituita da un sistema rigido composto da un supporto in lega di alluminio con un filo di contatto in rame. Per il calcolo della resistenza complessiva è stato preso in considerazione un valore conservativo della resistenza complessiva, in quanto bisogna tener conto della corrente che attraversa le rotaie; di conseguenza per la resistenza globale è stato stimato un valore pari a $0,028 \Omega / \text{km}$ per binario ferroviario. Per quanto concerne invece le sottostazioni elettriche, esse appartengono ad una classe di servizio VI (possono sostenere fino al 150% della potenza di trasmissione per un periodo continuo fino a 2 ore), erogano energia fino a 6MW e funzionano con raddrizzatori di potenza da 1500 V cc. Tali sottostazioni sono situate in prossimità delle stazioni e collegate alla linea nella sezione di riferimento della stazione.

La potenza necessaria ad ogni treno durante la sua marcia, viene calcolata secondo per secondo prendendo in considerazione la distanza relativa che sussiste tra tutti gli elementi di potenza facenti parti della linea, quindi treni e sottostazioni (Figura 51).

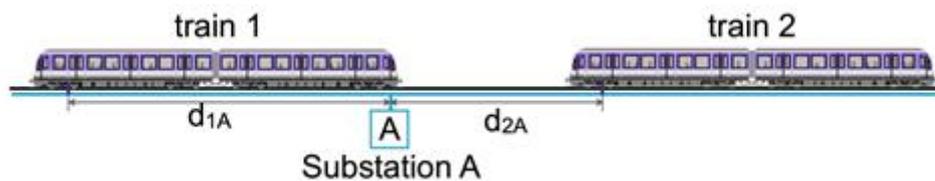


Figura 51: Esempio di distanza relativa tra treni e sottostazioni

Nella tabella successiva (Tabella 8) vengono riportate le progressive delle sottostazioni presenti lungo la linea e le stazioni ad esse corrispondenti.

Stazioni	Sottostazioni ID	Progressive
01 - Hastane	Tm1	0+50
02 - Station 1	Tm2	1+901
03 - Station 2	Tm3	3+494
04 - Station 3	Tm4	4+874
05 - Station 4	Tm5	6+324
06 - Station 5	Tm6	7+336
07 - Soyak	Tm7	8+690

Tabella 8: Posizione delle sottostazioni elettriche

4. Risultati

Nel seguente capitolo sono presentati i risultati ottenuti dai vari processi di simulazione caratterizzanti la linea metropolitana “*driverless*” *Hastane-Soyak*, al fine di pervenire ad una valutazione generale dei parametri prestazionali e dei consumi energetici relativi ai servizi di impiego della linea in esame, necessari per la ricerca della condizione di esercizio ottimale in grado di garantire minori consumi energetici e massime prestazioni in termini di livello di servizio offerto. A tal proposito sono state effettuate differenti tipi di analisi sulla linea in esame, aventi come oggetto l’individuazione del numero minimo di treni in grado di operare con un intervallo temporale minimo di 90 secondi in modo da soddisfare la domanda di traffico stimata dalla “*Istanbul Metropolitan Municipality*”. Queste analisi sono state realizzate tramite una valutazione delle prestazioni e dei consumi energetici in “*Normal conditions*”, una valutazione sull’impatto delle prestazioni e dei consumi energetici in “*Eco-Mode conditions*” per diversi limiti inferiori di velocità caratterizzanti la fase di *coasting*, utili all’individuazione della condizione di marcia ottimale. Successivamente, al fine di avere un quadro generale e completo della situazione, è stata eseguita un’analisi sulla circolazione ferroviaria in seguito ad eventuali guasti al materiale rotabile (guasto treno, guasto tratta di linea).

4.1. Valutazioni delle prestazioni e dei consumi in “*Normal conditions*”

Una volta implementata l’infrastruttura sul software OpenTrack, a partire dai dati relativi al tracciato plano-altimetrico e completate le operazioni di assemblaggio dei vari convogli sulla base dei dati forniti da parte dell’azienda, è stato possibile procedere con il processo di simulazione della marcia dei convogli ferroviari sulla linea appartenente alla città di Istanbul “*Hastane-Soyak*”. Le operazioni di simulazione della marcia dei treni sono state condotte facendo riferimento ad un distanziamento temporale minimo di 90 secondi. Da questo processo di simulazione sono state ricavate le prestazioni caratterizzanti i veicoli circolanti sulla linea, ovvero le tempistiche della corsa dei treni per entrambe le direzioni di marcia e le relative velocità commerciali. Nella tabella sottostante (Tabella 9) sono riportati i valori relativi ai parametri precedentemente indicati:

Operations in <i>Normal conditions</i>		
	Tempo di corsa [min:s]	Velocità Commerciale [km/h]
Hastane – Turnback Soyak	12': 17''	44,48
Turnback Soyak - Hastane	12' : 29''	43,76

Tabella 9: Prestazioni e consumi energetici in *Normal conditions*

Il tempo totale di viaggio (tempo giro) risulta essere pari a 25': 06'', ed è stato calcolato prendendo in considerazione i seguenti tempi esposti in Tabella 10:

Stazioni	Tempo [min:s]
Stop ad Hastane	00:20
Hastane – Soyak	10:52
Stop a Soyak	00:20
Soyak – Turnback Soyak	00:45
Turnback at Soyak	00:20
Soyak Turnback – Soyak	00:50
Stop at Soyak	00:20
Soyak – Hastane	10:59
Stop at Hastane	00:20
Totale [min:s]	25:06

Tabella 10: Tempistiche totali di viaggio

Terminato questo processo di simulazione ed ottenuti i vari parametri prestazionali è stato possibile procedere all'individuazione del numero minimo di treni circolanti sulla linea in grado di operare ad intervalli regolari di 90 secondi. Tale parametro risulta essere fondamentale al fine della ricerca della fase di *coasting* ottimale, ed è stato calcolato facendo riferimento al tempo di viaggio impiegato dai convogli nel percorrere l'intera linea. Ne

consegue che il numero dei treni in grado di circolare contemporaneamente sulla linea in esame risulta essere pari a 17.

Di seguito vengono riportati alcuni output ottenuti dal processo di simulazione eseguito in “Normal conditions”, come i diagrammi *velocità/spazio* inerenti alla marcia dei treni per entrambe le direzioni (Figura 52 e 53), e l’orario grafico (*Train Diagram*–Figura 54) costituito da due assi x, y rappresentanti rispettivamente i tempi e le distanze comprensive delle varie stazioni dislocate lungo la linea. Tramite tale diagramma è possibile pervenire ad informazioni relative all’orario di partenza dei treni, orario di arrivo e transito, tempi di sosta minimi alle fermate e coincidenze con altri servizi.

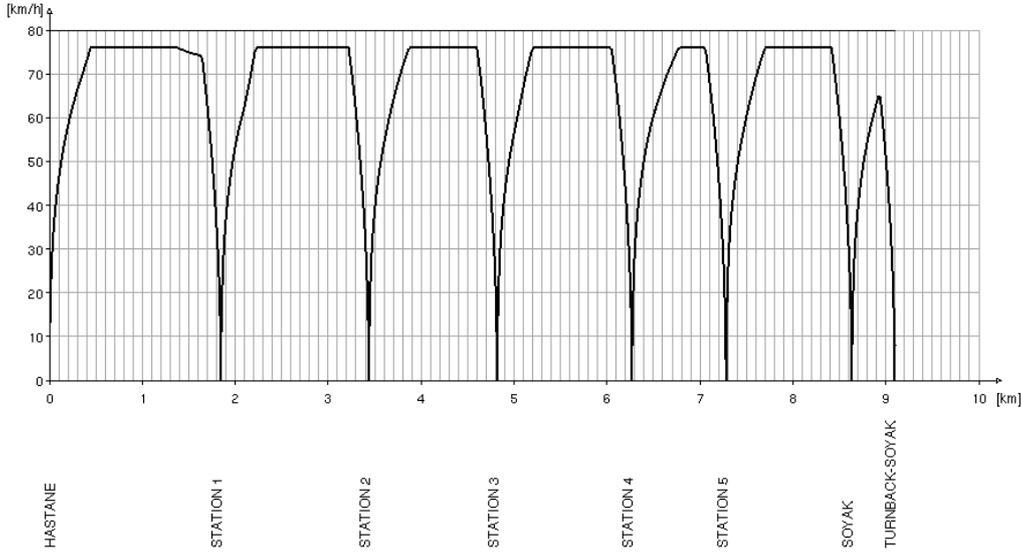


Figura 52: Diagramma velocità/distanza relativo alla direzione *Hastane- Turnback Soyak* in *Normal conditions*

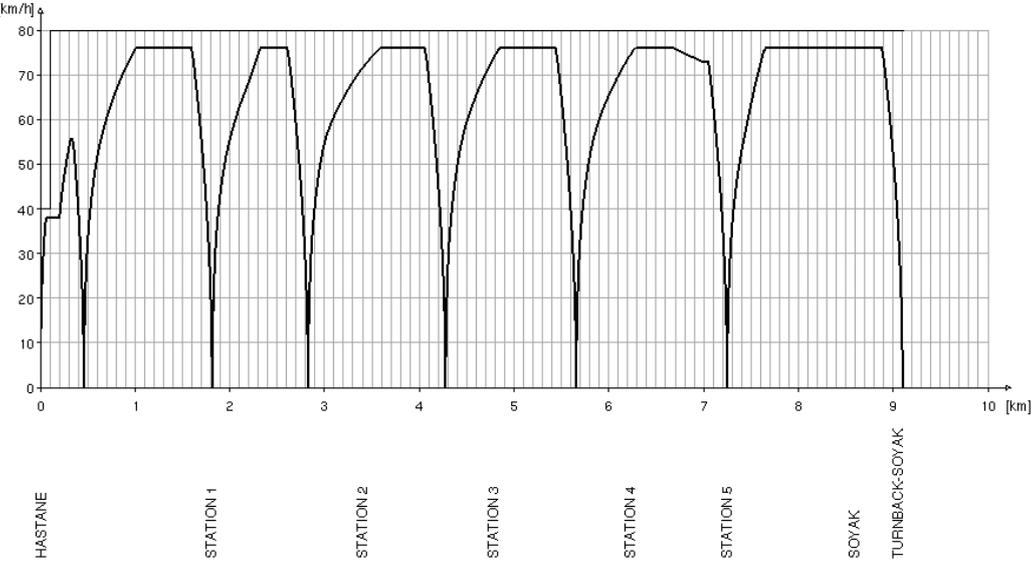


Figura 53: Diagramma velocità/distanza relativo alla direzione *Turnback Soyak-Hastane* in *Normal conditions*

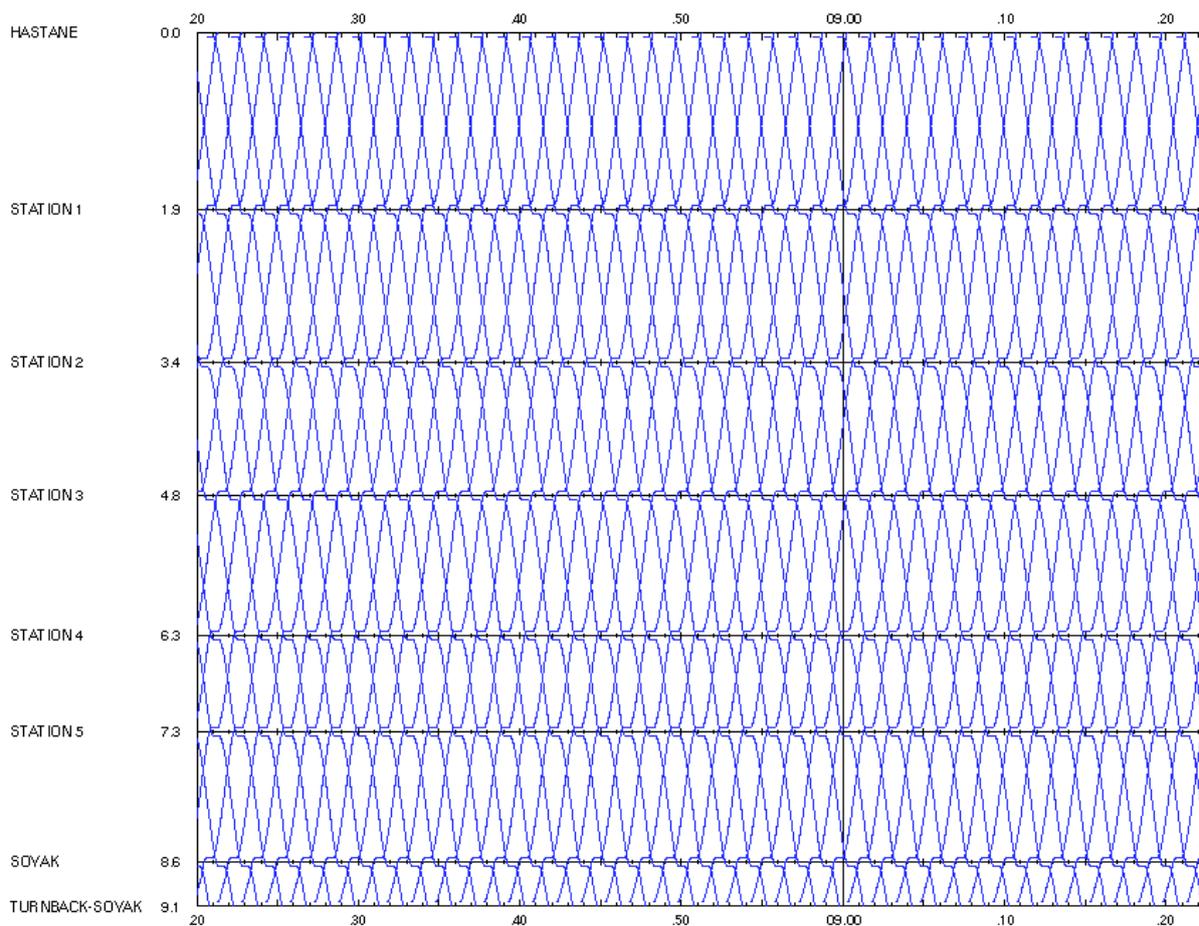


Figura 54: Train Diagram in Normal conditions con 90 s di headway

Il passo successivo infine consiste nella determinazione dei consumi energetici. A partire dagli output ricavati dal processo di simulazione precedente è stata eseguita una simulazione elettrica in Microsoft Excel integrando le prestazioni ricavate con un modello di infrastruttura elettrica e con le caratteristiche delle varie sottostazioni di energia disposte lungo la linea. Nella tabella sottostante vengono riportati i consumi energetici competenti a tale processo di simulazione:

Operations in <i>Normal conditions</i>	
	Consumi energetici [kWh]
Hastane – Turnback Soyak	296 kWh
Turnback Soyak - Hastane	368 kWh

Tabella 11: Consumi energetici in *Normal conditions*

4.2. Valutazioni delle prestazioni e dei consumi in “Eco-Mode conditions”

In secondo luogo, una volta ricavate le massime prestazioni relative alla linea in esame (*Normal conditions*), diverse simulazioni sono state condotte nuovamente al fine di ricavare la condizione ottimale tale per cui il rapporto consumi/prestazioni risulti ottimizzato. Tali simulazioni sono state condotte in una modalità di funzionamento ECO, vale a dire a risparmio energetico. Questa modalità prevede l’uso di un profilo di velocità efficiente dal punto di vista energetico in cui il treno accelera alle sue massime prestazioni e successivamente procede per inerzia (fase di *coasting*). Questa fase del moto viene utilizzata per decelerare dalla velocità massima raggiunta ad una certa velocità limite inferiore.

Ovviamente, la fase di *coasting* comporta una decelerazione relativamente forte durante l’ascesa, mentre non può essere utilizzato su discese ripide, poiché il veicolo potrebbe aumentare la sua velocità. Gli effetti che scaturiscono in seguito all’utilizzo di tale modalità di guida, risultano essere differenti nelle due direzioni a causa delle diverse resistenze che ogni treno durante la sua corsa incontra lungo la linea. Per eseguire le simulazioni sul software OpenTrack sono stati adoperati differenti profili di velocità e, per ognuna di esse, sono stati calcolati dapprima i parametri prestazionali ad essi competenti e dopo, integrando questi ultimi con un’infrastruttura elettrica, i relativi consumi energetici. Le figure seguenti (Figura 55 e 56) riportano i diagrammi *velocità / spazio* ottenuti dalle simulazione condotta in “Eco-Mode conditions” per diversi profili di velocità e per entrambe le direzioni.

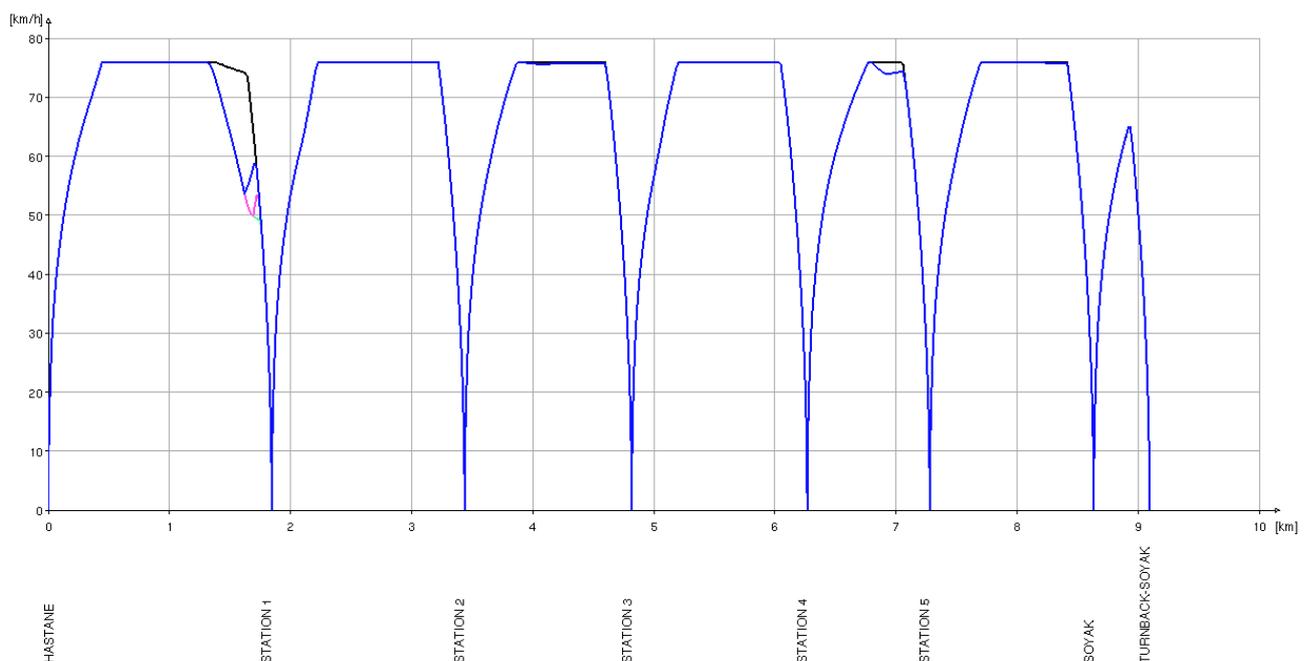


Figura 55: Diagramma velocità/spazio relativo alla direzione *Hastane-Turnback Soyak* in *Eco-Mode conditions*

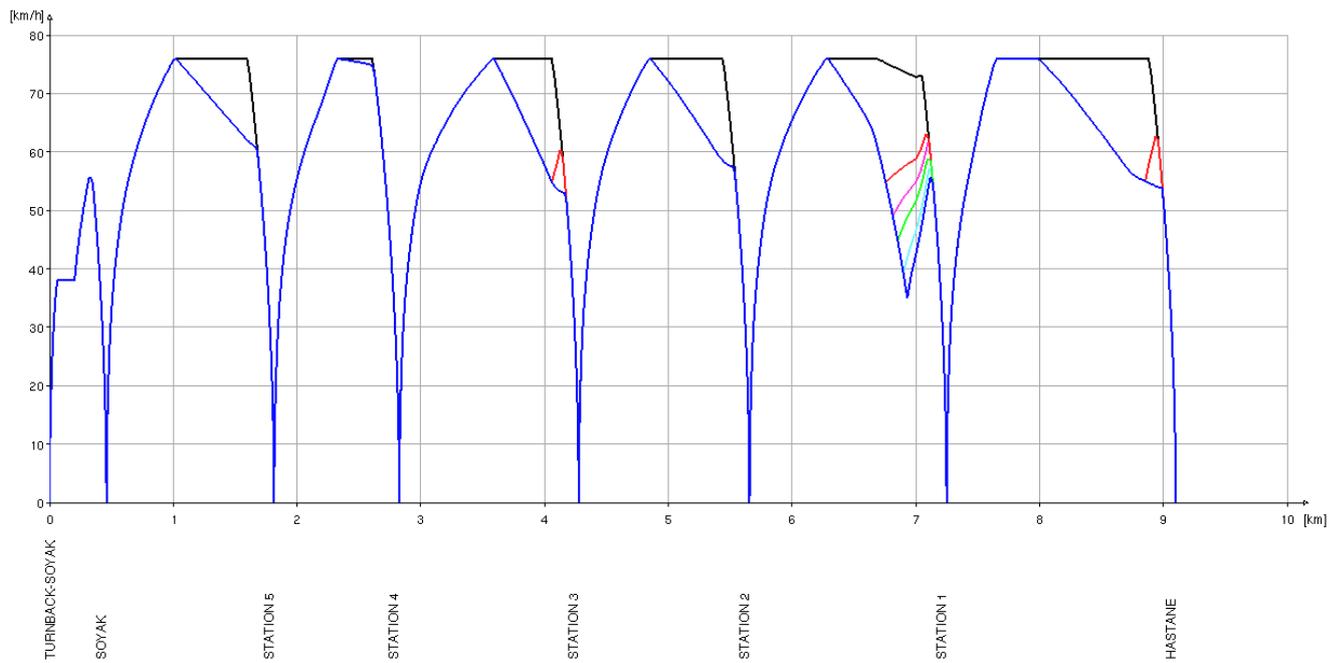
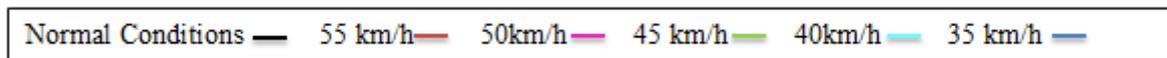


Figura 56: Diagramma velocità/spazio relativo alla direzione *Turnback Soyak - Hastane in Eco-Mode conditions*



Operations in Normal Conditions			
	Tempi di percorrenza	Velocità commerciale	Consumi energetici
Hastane – Turnback Soyak	12':17"	44,48 km/h	296 kWh
Turnback Soyak - Hastane	12':29"	43,76 km/h	368 kWh

Operations in Eco-Mode Conditions (Hastane-TurnbackSoyak-Hastane)			
Velocità di coastng	Tempi di percorrenza	Velocità commerciale	Consumi energetici
55 Km/h	12':21"	44,24	290 kWh
	12':57"	42,19	339 kWh
50 Km/h	12':21"	44,24	289 kWh
	13':00"	42,03	334 kWh
45 Km/h	12':22"	44,18	287 kWh
	13':01"	41,98	333 kWh
40 Km/h	12':22"	44,18	288 kWh
	13':03"	41,86	332 kWh
35 Km/h	12':22"	44,18	288 kWh
	13':05"	41,76	332 kWh

Tabella 12: Operazioni in *Eco-mode conditions*

In tabella 12 viene riportato in maniera analitica quanto rappresentato nei grafici precedenti (figura 55 e 56). Dagli output ricavati dalle varie simulazioni è possibile notare come le differenze che sussistono in seguito all'adozione dei vari profili di velocità di *coasting* risultano essere minime sia in termini energetici che in termini di tempo. Come precedentemente esposto, la tratta “*Soyak – Hastane*” presenta una fase di *coasting* più marcata rispetto alla tratta “*Hastane–Soyak*”. Tale aspetto è facilmente riscontrabile analizzando i dati relativi ai consumi energetici e ai tempi di percorrenza. Dalla tabella sovrastante è possibile constatare come nella tratta “*Soyak – Hastane*” (tratta prevalentemente a pendenza positiva) il recupero energetico sia molto più cospicuo rispetto alla tratta inversa (tratta prevalentemente a pendenza negativa); di conseguenza il tempo necessario al convoglio nel percorrere la linea in tale direzione risulta essere molto più ingente. Nel caso in esame, dalle simulazioni effettuate in *Eco-Mode* si evince che il numero minimo di treni in grado di circolare contemporaneamente sulla linea e di operare ad intervalli regolari di 90 secondi è dello stesso ordine di grandezza di quello calcolato in *Normal conditions*, vale a dire pari a 17 treni.

Nel caso in cui il tempo necessario al treno per coprire l'intera distanza della linea in esame risultasse essere troppo elevato, il livello di servizio offerto rischierebbe di essere compresso. Di conseguenza se ciò accadesse, al fine di ripristinare lo stesso livello di servizio sulla linea, sarebbe necessario introdurre un quantitativo di convogli maggiore indispensabili a soddisfare la domanda di traffico nelle ore di punta, il che comporterebbe un aumento del costo globale del sistema. Nella tabella seguente (tabella 13) vengono riportati i dati relativi ai tempi di percorrenza e ai consumi energetici ricavati dalle simulazioni effettuate in “*Eco-Mode conditions*” e rapportati con i risultati relativi alle operazioni condotte in “*Normal conditions*” dalle quali è possibile pervenire alla condizione ottimale di *coasting*.

	35 km/h	40 km/h	45 km/h	50 km/h	55 km/h
Incremento temporale	+2.65%	+2.52%	+2.39%	+2.27%	+2.08%
Risparmio energetico	+6.62%	+6.62%	+6.62%	+6.17%	+5.27 %

Tabella 13: Incrementi temporali e risparmi energetici

I risultati pervenuti sono stati calcolati facendo riferimento al tempo giro, ovvero il tempo necessario al convoglio a percorrere la linea in entrambe le direzioni, comprensivo del tempo di inversione al capolinea “*Turnback-Soyak*” pari a 20 secondi. Dalla tabella 13, e come esposto precedentemente nelle considerazioni effettuate sui grafici *spazio-tempo* (figura 52 e 53), *velocità-tempo* (figura 49 e 50) e *distanza-tempo* (figura 47 e 48), si evince che all’aumentare del limite inferiore di velocità di *coasting* diminuisce il tempo necessario al convoglio a percorrere l’intera linea e aumentano i consumi energetici. Di conseguenza risulta facilmente intuibile che la condizione di esercizio ottimale tale per cui si hanno minori consumi energetici e massime prestazioni in termini di livello di servizio offerto risulta essere quella caratterizzata da un limite inferiore di velocità di *coasting* pari a 45 km/h. A tale profilo di velocità compete un tempo giro pari a 25’ 43’’ ed un risparmio energetico rispetto alla simulazione condotta in *Normal conditions* pari a 44kWh. Di seguito (figura 57) viene riportato il grafico orario (*Train diagram*) corrispondente alla condizione di esercizio ottimale.

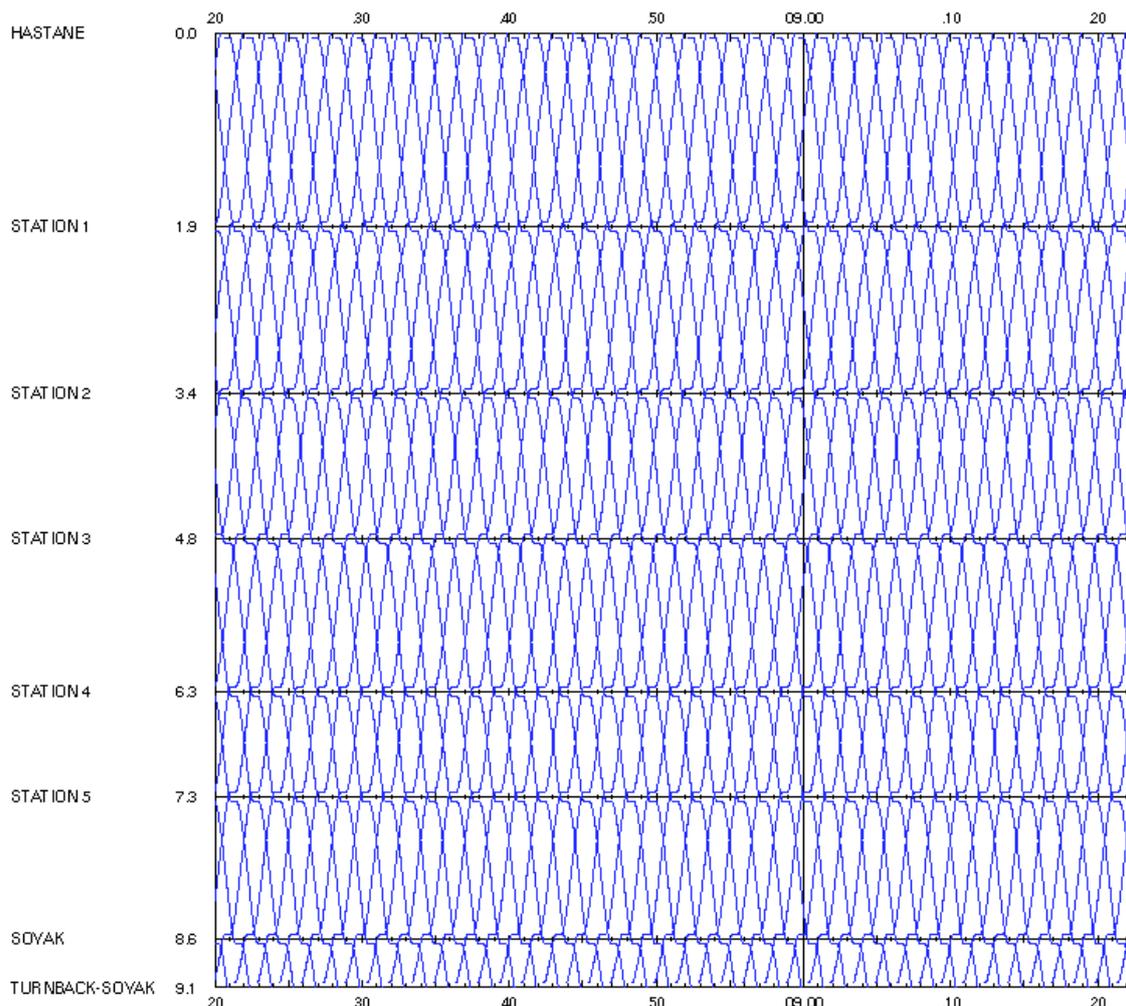


Figura 57: *Train Diagram in Eco-Mode conditions con 90 s di headway*

4.3. Valutazioni sugli effetti causati da guasti al materiale rotabile

Al fine di valutare gli effetti sulla circolazione ferroviaria conseguentemente a guasti al materiale rotabile diversi processi di simulazione sono state eseguiti sulla linea in esame. Nello specifico, sono stati analizzati due scenari differenti:

- Guasto su una singola sezione della linea tra 2 scambi (switch) successivi;
- Guasto ad un treno guidato manualmente a 15 km/h dalla Station 3 fino alla zona di ricovero localizzata in prossimità di “*Turnback Soyak*”.

Per il primo scenario è stato simulato un guasto in ogni sezione, in modo tale da valutare il tratto più critico. Dato che sulla linea *Hastane-Soyak* sono presenti 4 scambi bidirezionali, la linea è stata suddivisa in 3 sezioni differenti, ognuna caratterizzata da una diversa lunghezza e con un numero di fermate variabile al loro interno. Ovviamente quando si opera su un binario singolo in una sezione, il distanziamento temporale minimo (*headway*) su quella sezione diventa l'*headway* dell'intera linea. La Figura 58 mostra il modello di infrastruttura della linea, in cui sono evidenziati gli scambi.

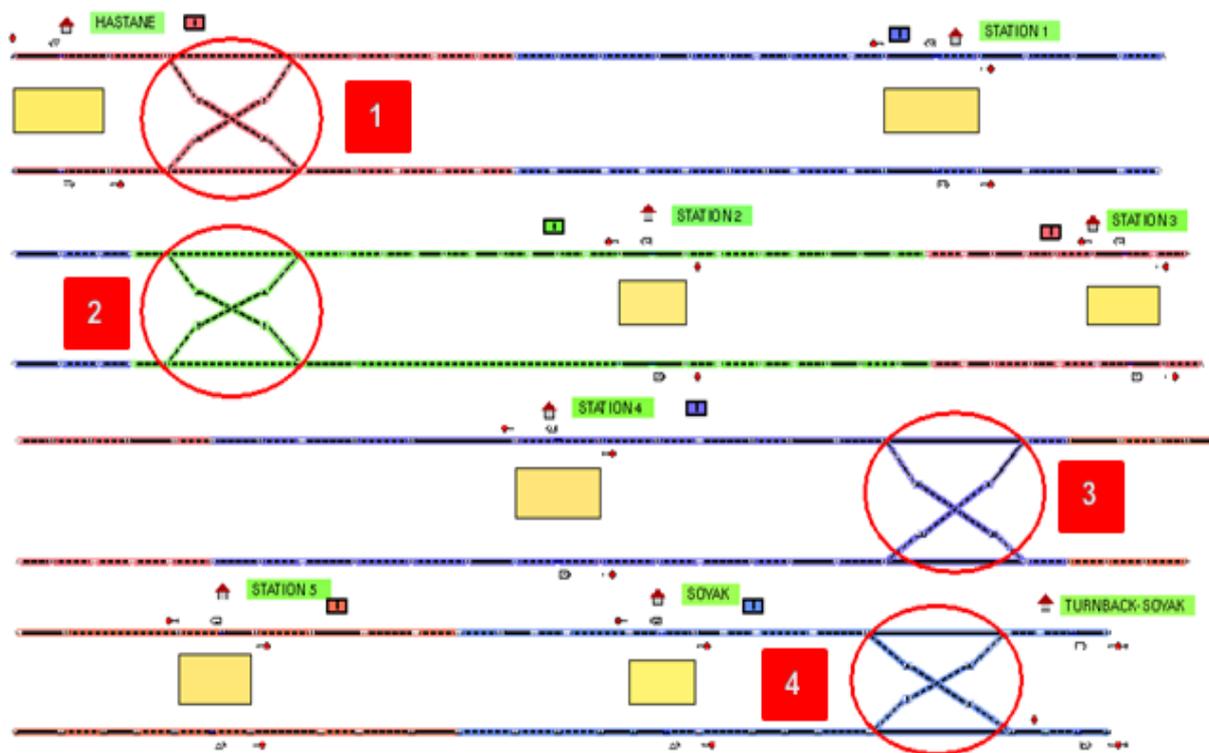


Figura 58: Localizzazione degli scambi sulla linea *Hastane-Soyak*

Nella tabella sottostante (Tabella 14) sono riportati i valori di *headway* e frequenza oraria ottenuti dai processi di simulazione in seguito ai guasti presenti sulle differenti sezioni.

Not – Working section	Headway	Frequency [trains/h]
1 – 2	06'51''	8
2 – 3	11'20''	5
3 – 4	8'16''	7

Tabella 14: Circolazione ferroviaria in caso di guasti alla linea

Come è possibile notare dalla tabella 14, la sezione 2-3 risulta essere quella più critica essendo contraddistinta da un alto numero di fermate intermedie (3) e da una lunghezza maggiore rispetto a tutte le altre. Di seguito in Figura 59 viene esposto l'orario grafico (*Train Diagram*) relativo al processo di simulazione eseguito nella sezione più critica ovvero la sezione 2-3.

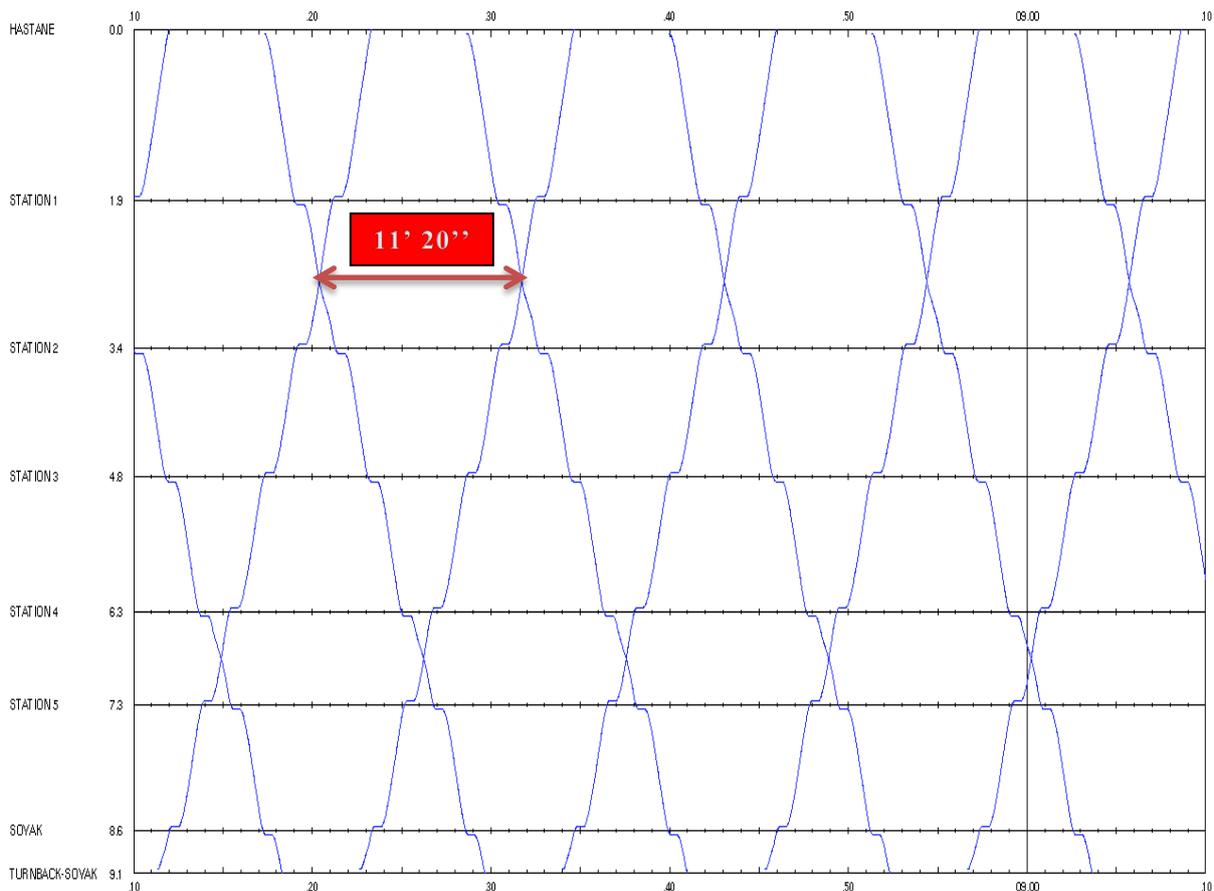


Figura 59: *Train Diagram* in caso di guasto sulla sezione 2-3

Il secondo scenario analizzato consiste nell'individuazione delle tempistiche necessarie al ripristino delle condizioni di regime, in seguito al guasto di un treno alla Station 3. In particolar modo viene calcolato dapprima il tempo totale di ostruzione di marcia ordinaria e in seguito, il tempo totale di ripristino delle condizioni di marcia ordinaria. Dato che il sistema metropolitano in esame consta essere un sistema “*driverless*” e non un sistema “*UTO*”, le operazioni di recupero del convoglio vengono effettuate manualmente e non in maniera automatica. Il treno viene guidato alla velocità di 15 km/h dalla Station 3 fino alla zona di ricovero localizzata in prossimità di “*Turnback Soyak*”. Dall'orario grafico (Figura 60) generato dal processo di simulazione è stato possibile risalire alle seguenti tempistiche:

- tempo totale dell'ostruzione di marcia ordinaria dei treni = 19 minuti
- tempo totale di ripristino delle condizioni di marcia ordinaria = 42 minuti

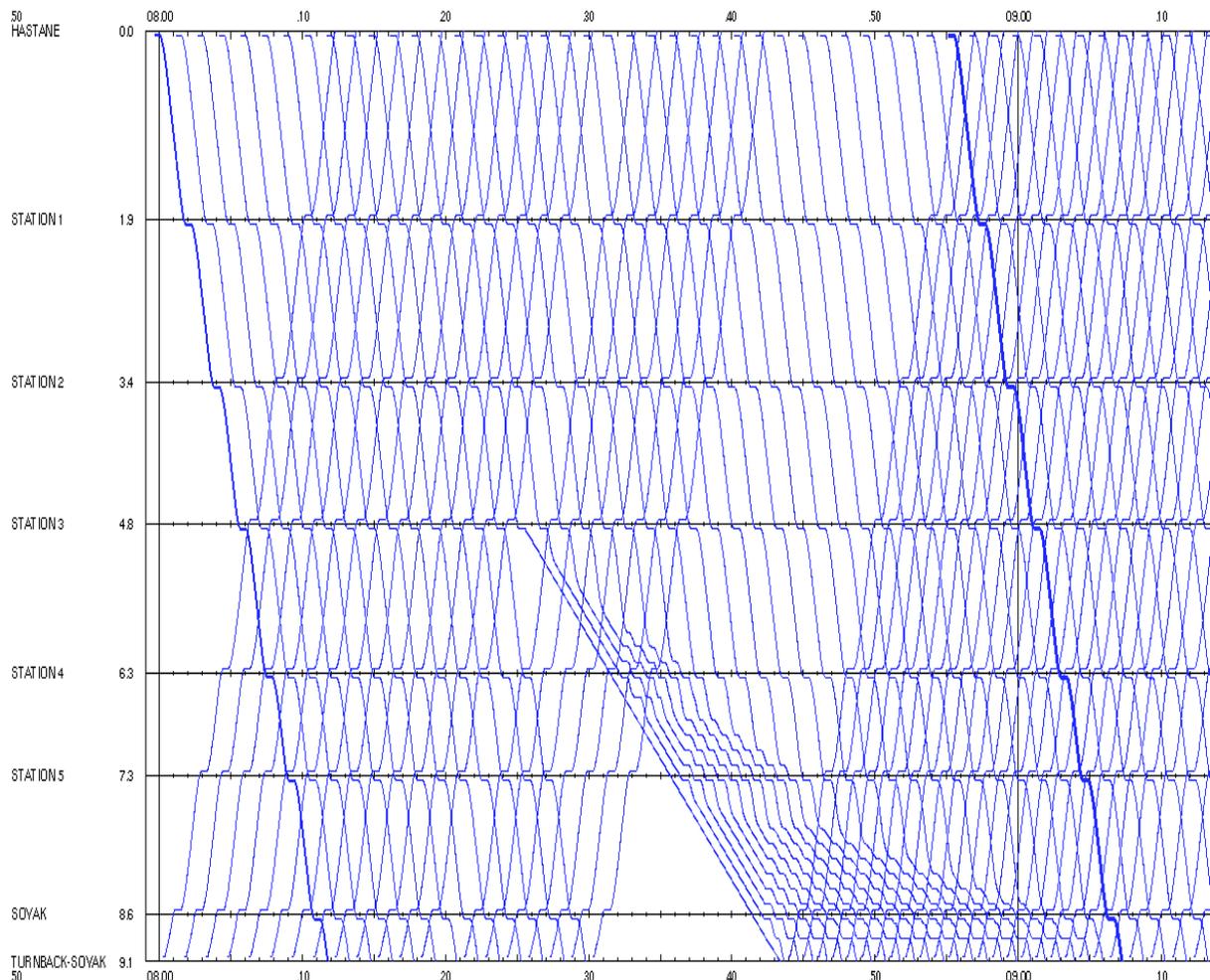


Figura 60: *Train Diagram* relativo al guasto di un treno guidato manualmente a 15 Km/h dalla Station 3 alla zona di ricovero

4.4 Efficienza energetica di sette sottostazioni in condizioni standard

Dall'integrazione degli output ricavati dai vari processi di simulazione con il modello di infrastruttura elettrica composto dalle varie sottostazioni dislocate lungo la linea “*Hastane-Soyak*”, è stato possibile calcolare dapprima la potenza erogata da ogni singola sottostazione e successivamente, il consumo di potenza totale della linea necessario ad alimentare la marcia dei convogli ferroviari. Tale processo consiste in una simulazione elettrica sviluppata su Microsoft Excel. A partire dai dati inerenti la posizione, l'accelerazione, la velocità, lo sforzo di trazione e di frenata e le resistenze dei vari convogli calcolati secondo per secondo, si perviene in un primo momento al consumo di potenza meccanica e in seguito al consumo di potenza elettrica dei singoli treni tramite la metodologia precedentemente esposta (par. 3.6.). Per condizione standard, si intende la condizione in cui tutte e sette le sottostazioni elettriche appartenenti alla linea in esame risultano essere operative. Presupponendo un distanziamento minimo temporale tra treni successivi di 90 secondi nelle ore di punta, è sufficiente prendere in considerazione un solo periodo di tempo. La potenza fornita da ogni sottostazione (6MW) risulta essere conciliabile con le specifiche tecniche della classe di alimentazione VI (una sottostazione elettrica di classe VI può sostenere una potenza fino al 150% della potenza di trasmissione per un periodo continuo fino a 2 ore). Nella figura sottostante (Figura 61) viene riportata la quantità di energia erogata da ciascuna sottostazione elettrica, mentre la figura 62 mette in evidenza il consumo totale di energia necessaria ad alimentare l'intera linea metropolitana.

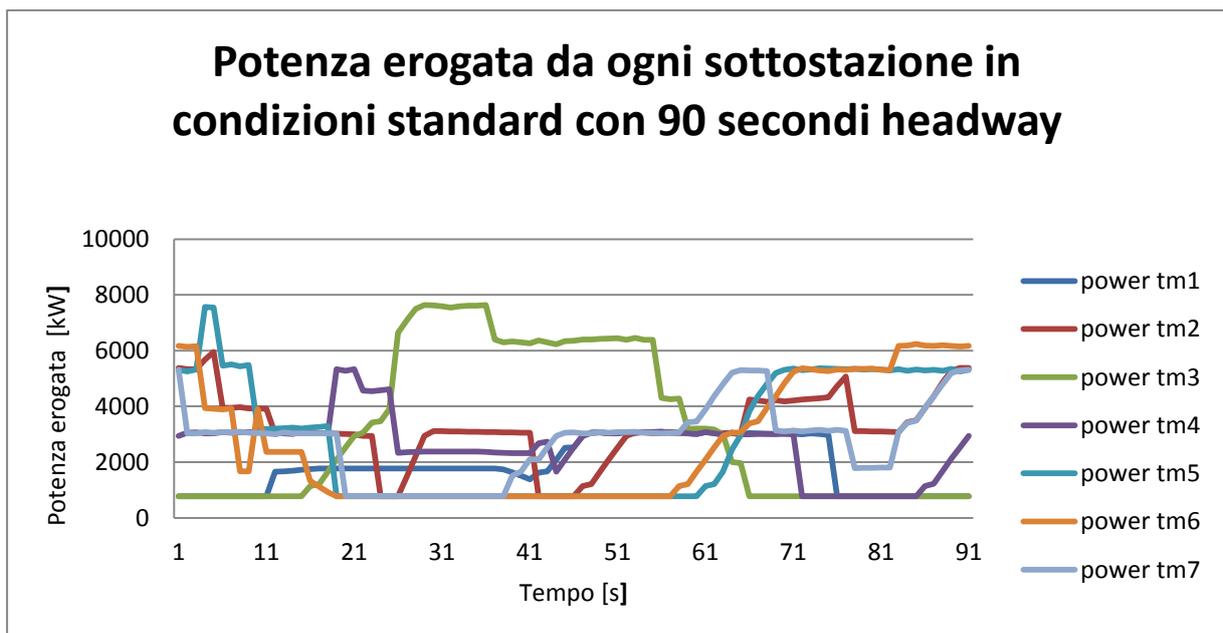


Figura 61: Potenza erogata da ogni sottostazione in condizione standard

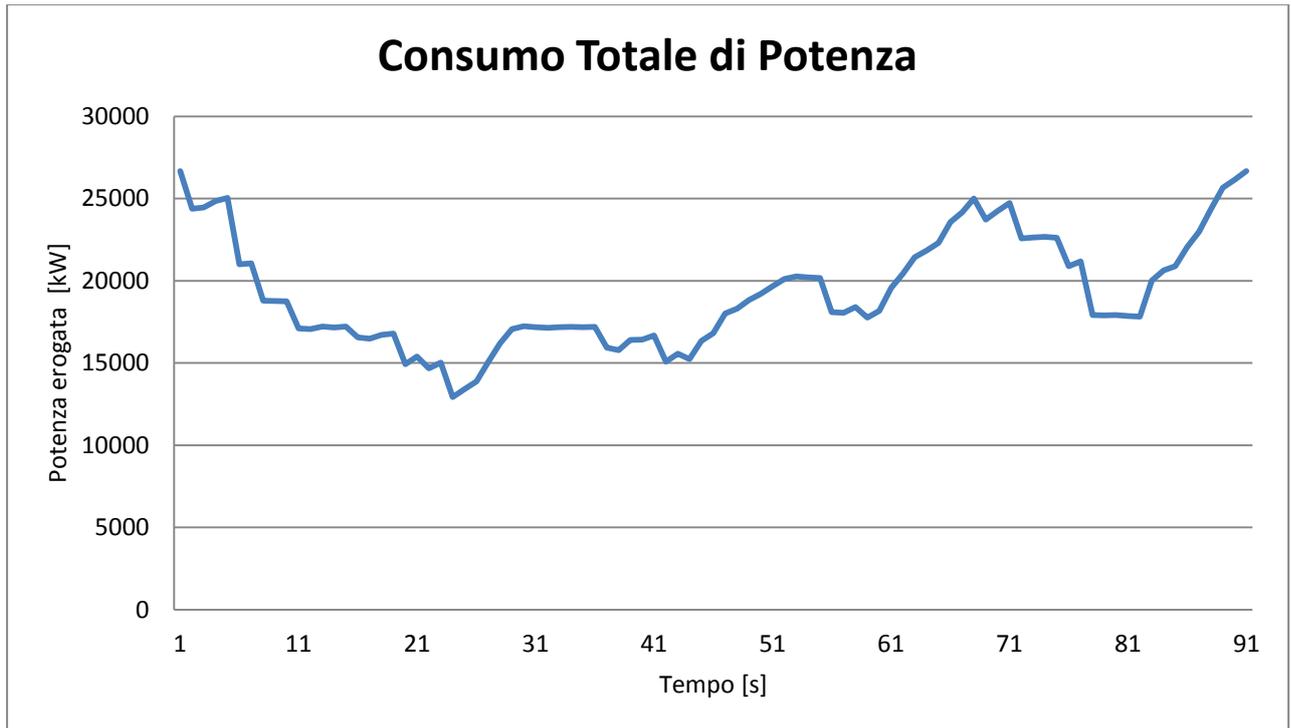


Figura 62: Consumo totale di potenza necessaria ad alimentare l'intera linea

Dalla Figura 62 è possibile constatare che il consumo energetico medio è di circa 20 MW con picchi massimi di 26,7 MW e un minimo di circa 13 MW. Questa variazione è dovuta alla concomitanza delle fasi di accelerazione e frenata dei diversi treni che percorrono la linea. Durante le operazioni di marcia ordinaria, la variabilità dei tempi di corsa e dei tempi di arresto può portare a una diversa sovrapposizione delle fasi di marcia del treno e, di conseguenza, a diversi consumi massimi e minimi.

5. Conclusioni

L'obiettivo prefissato dallo studio condotto sulla linea *Hastane-Soyak* verte sull'applicazione dei servizi di impiego di una linea metropolitana ad automazione integrale, al fine di verificarne la fattibilità di progettazione e l'identificazione dei parametri prestazionali principali. Questi ultimi risultano necessari per la ricerca della condizione di esercizio ottimale in grado di garantire minori consumi energetici e massime prestazioni in termini di livello di servizio offerto in differenti condizioni di esercizio.

Tramite l'utilizzo del software OpenTrack, a partire dai dati forniti dalla Geodata S.p.a. relativi al tracciato plano-altimetrico e al materiale rotabile, sono state condotte simulazioni della marcia dei treni facendo riferimento ad un distanziamento temporale minimo di 90 secondi. Questo processo ha permesso di ricavare le prestazioni dei veicoli circolanti sulla linea, le tempistiche della corsa e la relativa velocità commerciale. Dalle simulazioni condotte in "*Normal condition*" è stato ricavato un tempo totale di viaggio pari a 25':06", calcolato facendo riferimento al tempo di viaggio impiegato dai singoli convogli nel percorrere l'intera linea compreso il tempo di inversione al capolinea (20"). Una volta ottenuto il tempo necessario al convoglio a percorrere l'intera linea, è stato possibile individuare il numero dei treni in grado di circolare contemporaneamente sul tracciato al fine di soddisfare la domanda di traffico stimata dalla "*Istanbul Metropolitan Municipality*" per soddisfare il servizio nelle ore di punta. Tale valore pari a 17 treni risultata essere un parametro fondamentale per l'ottimizzazione del rapporto consumi/prestazioni.

Dall'analisi effettuata sul caso studio in esame si evince che i risultati pervenuti in seguito alle operazioni condotte in "*Eco-Mode conditions*", forniscono esiti molto soddisfacenti. Dagli output ottenuti dai vari processi di simulazione condotte in modalità ECO e per differenti profili della velocità di *coasting*, si ricava il numero minimo di treni in grado di circolare sulla linea, il quale risulta essere dello stesso ordine di grandezza di quello calcolato in "*Normal condition*" cioè 17 treni. Abbastanza interessanti risultano essere i dati relativi ai tempi di percorrenza ed ai consumi energetici ottenuti dalle varie simulazioni condotte in "*Eco-mode condition*". Tali risultati rapportati con quelli ottenuti in "*Normal condition*" hanno permesso di pervenire alla condizione di *coasting* ottimale in grado di garantire minori consumi energetici e massime prestazioni in termini di livello di servizio offerto. Nell'individuazione di tale fase di esercizio ottimale è stato considerato che nel caso in cui il tempo necessario al treno per coprire l'intera distanza della linea in esame risultasse essere troppo elevato, il

livello di servizio offerto rischierebbe di essere compresso. Di conseguenza se ciò accadesse, al fine di ripristinare lo stesso livello di servizio sulla linea, sarebbe necessario introdurre un quantitativo di convogli maggiore, indispensabili a soddisfare la domanda di traffico nelle ore di punta, il che comporterebbe un aumento del costo globale del sistema.

In tal senso, la condizione ottimale individuata risulta essere caratterizzata da un limite inferiore di velocità di *coasting* pari a 45 km/h, con un tempo giro pari a 25':43''.

Dal confronto con il processo di simulazione effettuato in “*Normal conditions*” è possibile notare come tale fase di esercizio ottimale (45 km/h) presenti uno scostamento temporale rispetto al caso di guida non ottimizzata pari a 2.39 % (+37 secondi) e ciò garantisce al treno la possibilità di recuperare un eventuale ritardo dovuto a cause di forza maggiore, come ad esempio le perdite di tempo durante la sosta all'interno delle stazioni dislocate lungo la linea dovute al sovraffollamento; a tale incremento temporale corrisponde un recupero energetico pari a 6.62 % (44 kWh).

La tratta “*Soyak – Hastane*” presenta una fase di *coasting* più marcata rispetto alla tratta “*Hastane – Soyak*”. Tale differenza è dovuta al fatto che gli effetti che scaturiscono in seguito all'utilizzo di tale modalità di guida, risultano essere differenti nelle due direzioni a causa delle diverse resistenze che ogni treno durante la sua corsa incontra lungo il tracciato. Essendo la tratta “*Soyak – Hastane*” caratterizzata prevalentemente da tratti a pendenza positiva, ne consegue un recupero energetico molto elevato, poiché la fase di *coasting* comporta una decelerazione relativamente forte durante l'ascesa; di conseguenza il tempo necessario al convoglio nel percorrere la linea in tale direzione risulta essere più elevato rispetto alla direzione inversa.

Prendendo atto dell'elevato numero di corse effettuato dai treni circolanti sulla linea in esame nel corso di un'intera giornata di esercizio, un risparmio seppur minimo di energia risulta comunque essere un grande vantaggio al fine di ottimizzare l'efficienza energetica dell'intero sistema metropolitano. A tal proposito, dallo studio effettuato nel presente lavoro è stato possibile effettuare un confronto avente come oggetto l'energia risparmiata da codesto sistema metropolitano durante un intero anno di esercizio. Considerando un *headway* pari a 90 secondi (distanziamento temporale minimo) in 1 ora di servizio vengono effettuate 40 corse. Dato che l'energia risparmiata di una singola corsa in condizioni di guida ottimizzata risulta essere pari a 44 kWh rispetto alle condizioni di guida non ottimizzata, ne segue che il recupero totale di energia in un'ora sarà pari a 1.760 kWh. Presupponendo un servizio con 5 ore di punta al giorno di attività in grado di soddisfare il livello di servizio richiesto, il risparmio energetico nel corso di un'intera giornata sarà pari a 8.800 kWh. Infine si può

osservare come per un servizio di trasporto metropolitano operante 350 giorni su 365 il risparmio annuale complessivo sarà di 3.080.000 kWh. In termini di corse effettuate, ciò si traduce in un risparmio annuo di 4639 corse. Di conseguenza, i benefici apportati dall'utilizzo di una guida ottimizzata all'interno di un sistema metropolitano risultano notevoli, sia in termini economici che indirettamente ambientali.

Gran parte dei risultati ottenuti dall'analisi e dalle simulazioni condotte sullo studio in esame risultano essere coerenti ed in linea con quelli pervenuti dai vari casi studio analizzati nello stato dell'arte [8] [9] [10] [11] inerenti all'impiego di un sistema metropolitano ad automazione integrale e alle componenti tecniche ad esso connesse (sistemi di segnalamento, livelli di automazione, materiale rotabile). Naturalmente tali risultati non possono essere del tutto simili data la diversità delle linee analizzate e la moltitudine di variabili che entrano in gioco (potenza, lunghezza linea, tecniche di ottimizzazione energetica, materiale rotabile, ecc.). Anche il tipo di modello con cui è stato condotto lo studio gioca un ruolo fondamentale. Come precedentemente esposto all'interno dello stato dell'arte, l'utilizzo di tecniche come l'algoritmo genetico, da un lato consentono di amplificare le prestazioni ma, allo stesso tempo, un loro uso all'interno di contesti reali risulta di difficile applicazione dato che questo tipo di algoritmi non sono deterministici, di conseguenza il livello di prestazione raggiunto non sempre potrebbe essere lo stesso. L'utilizzo di modelli basati su simulazioni invece permette di ottenere risultati molto più accurati e precisi facilmente applicabili ai casi reali. Infine, è utile ricordare che in una linea metropolitana *driverless*, tutte le operazioni inerenti la trazione, frenata e marcia dei veicoli, attribuiti al treno dal sottosistema ATO (*Automatic Train Operation*), sono effettuate in *Eco-Mode conditions*, e salvo casi particolari, come ad esempio le condizioni di "*Fail-System*" precedentemente analizzate, la guida è condotta in condizioni normali e di conseguenza il recupero energetico passa in secondo piano.

6. Bibliografia

- [1] Ente nazionale di normazione UNI, norma tecnica 8379-2000, “Sistemi di trasporto a guida vincolata (ferrovia, metropolitana, metropolitana leggera, tranvia veloce e tranvia) termini e definizioni”;
- [2] Dalla Chiara B., Trasporti, Dispensa per l’insegnamento di "Tecnica ed economia dei trasporti", Politecnico di Torino, 2016;
- [3] Encyclopaedia Britannica, “*Rapid Transit*”:
[<https://www.britannica.com/technology/rapid-transit>];
- [4] Vuchic V. R., “*Urban Transit – System and Technology*”, Wiley, 2007;
- [5] UITP “International Association of public Transport”, “Metro Automation Facts, Figures and Trends”, *Press Kit. Brussels, Belgium: Union. International des Transports Publics 2011*;
- [6] Fischer E., ”*Justifying automation*”: [Railway Technology.com.], 23 August 2011;
- [7] UITP “International Association of public Transport”, [Automated.metro.org];
- [8] Brenna M., *et al*, “Application of genetic algorithms for driverless subway train energy optimization”, *International Journal of Vehicular Technology 2016*;
- [9] Powell J. P., *et al*, “Potential Benefits and Obstacles of Implementing Driverless Train Operation on the Tyne and Wear Metro: A Simulation Exercise”, *Urban Rail Transit*, 2.3-4: 114-127, 2016;
- [10] Brenna M., *et al*, “Increasing of subway lines capability through moving block signaling systems: Modeling and simulation”, *In: AEIT International Annual Conference (AEIT), IEEE, p. 1-6, 2016*;
- [11] Xun J., *et al*, “Coordinated train control in a fully automatic operation system for reducing energy consumption”, *Computers in railways XIII: Computer system design and operation in the railway and other transit systems*, 127: 3, 2013;
- [12] Melo P., *et al*, “Determinants of delay incident occurrence in urban metros”, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2216: 10-18, 2011;
- [13] Mr. Betis A., *et al*, “L’evoluzione del Sistema di automazione della M5 alla M4, evoluzione e non rivoluzione”, *Hitachi-Ansaldo STS, Conferenza Cifi Milano in collaborazione con MM,06-04- 2017*;

- [14] Carvajal-Carreño W., *et al*, “Fuzzy train tracking algorithm for the energy efficient operation of CBTC equipped metro lines”, *Eng. Appl. of AI* 53 : 19-31, 2016;
- [15] RFI, “Rete ferroviaria Italiana”, “Attivazione SCMT-SSC Roma”, 01 Febbraio 2008;
- [16] Cohen Judith M., *et al*, “Impacts of unattended train operations on productivity and efficiency in metropolitan railways”, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2534: 75-83, 2015;
- [17] Zhu Li, *et al*, “Handoff management in communication-based train control networks using stream control transmission protocol and IEEE 802.11 p Wlans”, *EURASIP Journal on wireless communications and Networking*, 2012.1: 211, 2012;
- [18] Metro And Rail Ventilation, [www.indiamart.com/systemair/products.html#metro-and-rail-ventilation];
- [19] IEC “International Electrotechnical Commission”, IEC 62290-1: “Railway applications: urban guided transport management and command/control systems”, *Part 1: system principles and fundamental concepts*, 2006;
- [20] Bassani M., Dispense per l'insegnamento di "Infrastrutture Viarie", Politecnico di Torino;
- [21] Stagni E., “Meccanica della locomozione”, *Patron, Bologna, 1980*;
- [22] Inturri G., Dispensa per l'insegnamento di “Fondamenti di Trasporti”, Università di Catania dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale 2011/2012;
- [23] Dalla Chiara B., “Engineering and design of railway systems”, *CLUT, 2012*;
- [24] Carpignano A., “Meccanica dei trasporti ferroviari e tecnica delle locomotive”, *Levrotto & Bella, 1985*;
- [25] OpenTrack: <http://www.opentrack.ch>, Maggio 2018;
- [26] Pourbaix J., “Towards a smart future for cities”, *Sharing Urban Transport Solutions*, 36.7, 2012;

Ringraziamenti

A conclusione di questo lavoro di tesi, è doveroso porre i miei più sentiti ringraziamenti alle persone che ho avuto modo di conoscere in questo importante periodo della mia vita e che mi hanno aiutato a crescere e maturare sia dal punto di vista professionale che umano. Desidero ringraziare innanzitutto il mio relatore di tesi, il Prof. Bruno Dalla Chiara, per il sostegno, la disponibilità, l'attenzione e la gentilezza dedicatami durante lo sviluppo di questo lavoro.

Un ringraziamento sentito va alla mia correlatrice, l'Ing. Federica Danise, che, grazie al suo supporto, è stata fondamentale alla realizzazione della tesi. Le sono grato per avermi sostenuto, consigliato ed aiutato in tutti i momenti di difficoltà.

Non posso esimermi dal ringraziare tutte quelle persone che mi hanno accompagnato durante questo straordinario percorso, persone con cui ho trascorso momenti indimenticabili ed instaurato un profondo e sincero legame di amicizia. Non farò un elenco di tutti voi amici miei, perché siete talmente tanti che servirebbe scrivere un'altra tesi, ma sappiate che ognuno di voi mi ha lasciato qualcosa dentro di veramente importante che porterò sempre con me, quindi grazie dal profondo del mio cuore.

Infine un ringraziamento particolare e toccante va alla mia famiglia, ai miei genitori Giovanni e Liliana, a mio fratello Michele e alla mia ragazza Daniela. Siete la parte più importante della mia vita, senza di voi di sicuro non sarei la persona che sono oggi. A voi va un infinito grazie per esserci sempre stati, per avermi incoraggiato, sostenuto, aiutato durante questo mio percorso e per non avermi mai fatto mancare l'amore di cui avevo bisogno. Desidero dedicare e condividere con voi questo mio traguardo raggiunto, del resto questa laurea è anche la vostra, grazie di cuore.

Grazie a tutti

Salvatore