

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile



Tesi di Laurea Magistrale

Analisi comparativa ed ottimizzazione dei consumi
energetici di metropolitane mediante algoritmi genetici

Relatore

Prof. Ing. Bruno Dalla Chiara

Correlatore

Ing. Nicola Coviello

Relatore esterno

Ing. Federica Danise (Geodata S.p.A)

Candidato

Davide La Gamba

Matricola 242532

Anno Accademico 2018/2019

Indice

Obiettivi della tesi	5
1. Introduzione	6
2. I trasporti e l'energia	8
2.1 I trasporti: storia ed evoluzione	8
2.2 Panoramica sui sistemi di trasporto pubblico locale	13
2.3 La metropolitana	15
2.4 Il consumo energetico nei sistemi di trasporto a impianto fisso	20
2.5 Meccanica della locomozione	23
2.5.1 Equazione del moto	23
2.5.2 Sforzo di trazione e fenomeno dell'aderenza	23
2.5.3 Resistenze al moto.....	25
2.5.3.1 Resistenze ordinarie	26
2.5.3.2 Resistenze accidentali	28
2.5.4 Fasi del moto	30
2.5.4.1 Accelerazione o avviamento	32
2.5.4.2 Regime	33
2.5.4.3 Coasting o marcia inerziale	33
2.5.4.4 Frenatura.....	34
2.6 Caso studio: la nuova linea metropolitana M11 Gaytterepe-Havalimani.....	36
3. Ottimizzazione multi-obiettivo con algoritmo genetico.....	44
3.1. Introduzione alle ottimizzazioni multi-obiettivo.....	44
3.2. Rassegna bibliografica di studi analoghi.....	46
3.2.1 Ottimizzazioni multi-obiettivo con algoritmo genetico	48
3.2.2 Ottimizzazioni multi-obiettivo senza algoritmo genetico	55
4. Algoritmo genetico proposto.....	56
4.1 Dati di input.....	57
4.2 La generazione	58
4.3 Le funzioni di valutazione.....	61
4.3.1 Funzione di valutazione della velocità	61
4.3.2 Funzione consumo energetico	62
4.3.3 Funzione comfort	63
4.3.4 Funzione tempo di percorrenza	63
4.4 Pareto ranking	64

4.5	Crossover.....	65
4.6	Mutazione.....	66
4.7	Correzione.....	67
4.8	Elitismo	67
5.	Risultati	69
5.1.	Lo scenario a massime prestazioni.....	70
5.2.	Scenario 1: n=100, evoluzioni=100, $v_{\min,regime}=90$ km/h	72
5.3.	Scenario 2: n=100, evoluzioni=100, $v_{\min,regime}=100$ km/h	80
6.	Conclusione.....	84
	Indice delle figure	90
	Indice delle tabelle	92
	Bibliografia	93
	Sitografia.....	95

Obiettivi della tesi

Lo studio svolto in questa tesi ha l'obiettivo di programmare un sistema di trasporto metropolitano e di valutarne i relativi impatti energetici allo scopo di poter individuare un modello di gestione dell'infrastruttura che possa garantire un servizio rapido, puntuale e confortevole ma che allo stesso tempo possa utilizzare in maniera efficiente l'energia necessaria al suo funzionamento.

È stato seguito un approccio di ottimizzazione multi-obiettivo nella quale l'individuazione della soluzione *ottima* è delegata a un algoritmo evolutivo di tipo genetico.

L'algoritmo genetico è stato sviluppato *ex novo* allo scopo di rispondere in modo attendibile e coerente ai problemi tipici della progettazione del profilo d'esercizio di una metropolitana ad automazione integrale.

1. Introduzione

Questa tesi vuole proporre un modello di progettazione dell'esercizio di una metropolitana automatica che sia capace di individuare le soluzioni che meglio rispondono alle moderne esigenze in termini di mobilità e di sostenibilità. Tale scopo è perseguito cercando di garantire un servizio di trasporto di qualità ma allo stesso tempo attento agli aspetti economici e ambientali.

Il lavoro è stato svolto in collaborazione con la società d'ingegneria Geodata Engineering S.p.A., che ha fornito tutte le informazioni inerenti l'infrastruttura oggetto di studio: la nuova linea metropolitana di Istanbul *M11 Gaytterepe – Havalimani*, attualmente in costruzione proprio ad opera di Geodata, che prevede di ultimarla nel 2020.

La tesi dapprima introduce, nel capitolo due, al mondo dei trasporti spiegandone l'evoluzione storica e tecnologica, dai primi mezzi di trasporto con motore a vapore alle più moderne metropolitane ad automazione integrale, per poi proseguire verso la moderna consapevolezza della limitatezza delle risorse disponibili, motivo per cui gli aspetti energetici e ambientali assumono sempre più rilevanza e non possono essere trascurati. Si procede facendo un focus sui sistemi di trasporto tipici del contesto urbano, dai bus alle moderne metro cui appartiene la linea oggetto di studio. Si concentra poi l'attenzione proprio sulle linee metropolitane, esponendo l'evoluzione tecnologica che questo sistema ha subito. Questi sistemi di trasporto si contraddistinguono per i consumi relativamente contenuti, se rapportati al numero di utenti trasportati, e a tal proposito vengono approfonditi proprio gli aspetti inerenti i consumi energetici degli sistemi a impianto fisso, categoria nella quale ricade la metropolitana (insieme a ferrovia, tram, impianti a fune e people mover). Chiude il secondo capitolo l'analisi dettagliata della linea oggetto di studio. Il capitolo tre introduce ai metodi di ottimizzazione, in particolare alla tipologia adottata in questo lavoro: le ottimizzazioni multi-obiettivo. Appare familiare affrontare un problema pensando che la soluzione migliore sia univoca e determinabile valutando un solo parametro: ad esempio la miglior soluzione per andare da un punto A a un punto B è quella in cui il tempo speso è il minore possibile, oppure il miglior processo di produzione è quello che costa meno, e così via. Questi sono problemi definiti da una unica funzione obiettivo. Nella realtà sono molto più comuni problemi con più funzioni obiettivo, spesso in contrasto fra loro, nella quale non è immediato individuare la soluzione migliore.

Si pensi all'esempio dello spostamento da A a B, se si approfondisce l'analisi ad altri parametri oltre il tempo di trasporto, si osserva che l'individuazione della *soluzione migliore* appare meno immediata. Infatti può essere definita tale sia la soluzione che impiega minor tempo, sia la soluzione che impiega maggior tempo ma che richiede minor consumo energetico, o anche una terza soluzione che sacrifica il tempo di viaggio a favore del comfort, magari evitando brusche accelerazioni/decelerazioni dovute al traffico.

Una volta definite le ottimizzazioni multi-obiettivo, viene posta l'attenzione su una particolare tipologia di metodi di tipo euristico che fanno riferimento alla ricerca operativa: gli algoritmi evolutivi e in particolare gli algoritmi genetici.

Gli algoritmi genetici si adattano perfettamente a quelle classi di problemi nelle quali occorre ampliare il più possibile lo spazio di ricerca delle soluzioni. Ciò viene fatto considerando una *popolazione di soluzioni*, anziché considerare una soluzione alla volta, e successivamente facendo evolvere gli individui di tale popolazione attraverso procedure che li stimolano ad assumere le caratteristiche che noi reputiamo positive.

In seguito viene dato uno sguardo alle ricerche scientifiche in ambito trasporti che hanno adottato algoritmi evolutivi, studiandone sia la struttura che i risultati.

Nel capitolo 4 viene esposto l'algoritmo sviluppato in questo lavoro, analizzandone ogni componente e spiegando le motivazioni di ogni scelta.

Nel capitolo 5 sono esposti i risultati delle simulazioni svolte e infine nel capitolo 6 sono riportate le conclusioni.

2. I trasporti e l'energia

2.1 I trasporti: storia ed evoluzione

Nella società di oggi la mobilità è un aspetto fondamentale delle nostre vite e la grande evoluzione delle tecnologie dei sistemi di trasporto degli ultimi due secoli ha portato sempre maggiori richieste di spostamento, richieste che hanno trovato risposta in servizi di trasporto sempre più rapidi e a portata di tutti. Se il '900 ha rappresentato il periodo di diffusione della mobilità, periodo rappresentato dal trinomio passeggero-infrastruttura-veicolo, con grandi evoluzioni negli ultimi due fattori, il nuovo millennio ha portato in essere un quarto grande aspetto non più trascurabile: l'energia.

Nei primi anni 2000 il consumo mondiale per la mobilità di persone e per il trasporto merci ha raggiunto quota 2,5 miliardi di tonnellate di petrolio equivalenti, pari a circa il 20% della domanda energetica complessiva¹. Si stima che circa il 60% dei consumi del settore sia destinato alla mobilità delle persone, nonostante si registri una continua crescita del settore trasporto merci [10]. Tra i sistemi di trasporto il più diffuso è senza dubbio quello su strada, seguito con molto distacco dai trasporti aerei, marittimi e ferroviari. Complessivamente tutto il settore dipende strettamente dai carburanti di origine fossile quali benzina, GPL, gasolio, olio combustibile, kerosene e metano con un'efficienza generalmente molto bassa dovuta ai motori a combustione interna nella quale, a titolo di stima, solo un terzo dell'energia consumata è trasformata in lavoro utile alla trazione.

Analizzando il settore storicamente, si nota che da inizio 1800 agli anni 2000 si è assistito ad un incremento dei consumi energetici di circa 30 volte; le principali cause di tale crescita sono state un enorme aumento della popolazione e la globalizzazione dei mercati avvenuti il seguito alla seconda guerra mondiale. Se nel 1820 ciascun individuo consumava 20 GJ di energia all'anno derivante quasi interamente dalla combustione del legname, nel 2000 si è assistito ad una quadruplicazione di questi valori abbandonando quasi completamente la combustione del legname e sostituendola con quella dei combustibili estratti dal sottosuolo quali gas naturali, petrolio e carbone [13]. Secondo una previsione dell'International Energy Agency, nel triennio 2010-2040 potremmo assistere ad un ulteriore aumento del 37% dei consumi mondiali di energia.

¹Fonte EIA 2013

Uno dei motivi che porta alla crescita della richiesta di mobilità è la concentrazione della popolazione in grandi città: basti dire che solo recentemente, nel 2007, la popolazione urbana ha superato quella rurale e si prevede che la percentuale continuerà a crescere (già oggi in Europa 3 persone su 4 vivono in città). Il processo di urbanizzazione che ha portato a questi numeri è consolidato nei paesi industrializzati, frutto della crescita del dopoguerra, mentre è ancora in corso nei paesi in via di sviluppo (Africa, Sud America, Asia pacifica e medio oriente). Tra questi paesi rientra anche la Turchia, che dal 1950 ha visto aumentare la popolazione urbana del 40%, valore doppio rispetto alla media mondiale [a].

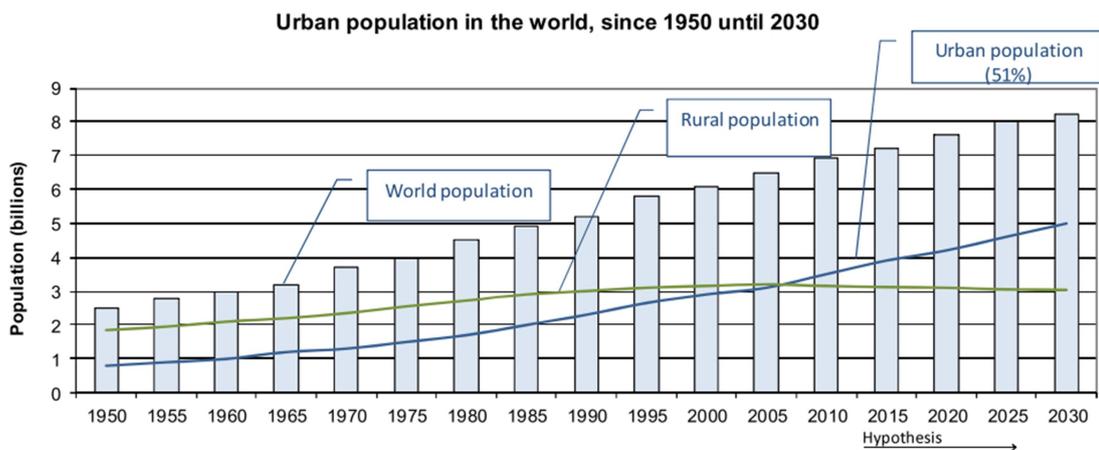


Figura 1 - Popolazione urbana e rurale dal 1950 al 2030²

Questa crescita è quindi da attribuire ai paesi in sviluppo economico e più in generale ad un trend che vedrà aumentare sia il numero delle grandi città nel mondo sia la popolazione al loro interno, come evidenziato dalla figura 2.

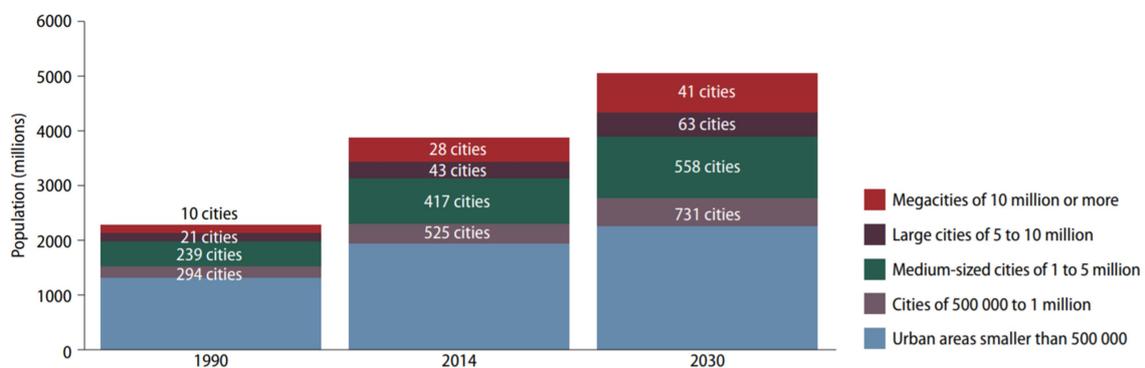


Figura 2 - Crescita globale della popolazione urbana è alimentata dalla crescita delle città [a]

² EU energy and transport in figures, Statistical Pocketbook 2010, p.18

Discorso analogo può essere effettuato sulla diffusione della motorizzazione: se nei paesi più industrializzati non assistiamo più ad una crescita delle vendite e della diffusione dell'automobile, nei paesi in via di sviluppo invece si riscontra un trend di crescita. Nazioni come Cina e India vedono la motorizzazione diffondersi sempre di più e, nonostante non siano ancora ai livelli dell'Occidente, consumano già quantitativi di petrolio analoghi. Se proiettiamo questo trend al futuro e consideriamo il potenziale bacino di utenza (oltre due miliardi di persone) si intuisce che la domanda potrebbe diventare eccessiva con conseguenti dubbi sulle disponibilità e sui prezzi del petrolio in futuro.

Sulla scorta delle previsioni di Hubbert, che nel 1956 predisse il picco di produzione di petrolio dei pozzi americani collocandolo nel 1971 e che in seguito si rivelò corretta, numerosi sono stati gli studi per determinare il picco di produzione mondiale di energia, che si sarebbe collocata fra il 2020 e il 2030. La messa a punto di nuove tecnologie estrattive nonché lo sfruttamento di energie rinnovabili ha tuttavia reso difficile questa previsione e ha distolto l'attenzione dall'esaurimento delle risorse.

L'ovvia limitatezza delle risorse non è l'unica criticità emersa dal grande consumo energetico, vi è anche l'aspetto ambientale e in particolare il possibile effetto sulla temperatura del pianeta: infatti la combustione di materiale organico, quali sono appunto i combustibili estratti dal sottosuolo, libera nell'atmosfera non solo l'anidride carbonica - vitale per le piante ma allo stesso tempo generatrice di effetto serra - ma anche diverse sostanze nocive. L'anidride carbonica di per se è naturalmente presente nell'atmosfera, in 391 ppm, e insieme ad altri gas presenti nell'atmosfera in minori concentrazioni cattura la radiazione solare e scalda il pianeta. Con la rivoluzione industriale e l'utilizzo sempre maggiore di energia da combustione da parte dell'uomo per le proprie attività giornaliere, la concentrazione dei gas serra è aumentata negli ultimi duecento anni raggiungendo valori 7/8 volte più elevati di quelli naturali.

I cambiamenti climatici e la questione energetica sono due importanti tematiche: i cambiamenti climatici sono un fenomeno che si manifesta periodicamente nella storia del pianeta e vi sono opinioni discordanti sul peso delle azioni dell'uomo nei suoi confronti. La questione energetica non è invece in discussione e riguarda in modo importante i trasporti e l'economia di ogni paese. Una correlazione certa fra emissioni di gas serra e cambiamenti climatici non esiste, ma vi è senz'altro una correlazione fra consumo di petrolio ed emissioni dei cosiddetti climalteranti. In questo senso i sistemi di trasporto, in quanto grandi consumatori di petrolio, sono coinvolti in entrambe le questioni [10].

Per capire quali sono stati i passi che ci hanno portato fino alla situazione odierna, occorre fare un passo indietro e guardare allo sviluppo storico della tecnologia nei trasporti:

l'invenzione del motore a vapore di Watt ha segnato l'inizio di una nuova era per il consumo di energia e, esattamente come per il settore manifatturiero, anche i trasporti trassero un forte impulso dalla possibilità di disporre di potenze molto più elevate rispetto al passato. Con i primi battelli e treni a vapore cominciò la crescita della velocità di spostamento, così le distanze si accorciarono e la mobilità di persone e il trasporto di merci si impennò come mai nella storia. Si era ancora in una fase in cui solo mezzi di grandi dimensioni potevano permettersi di montare i nuovi dispositivi meccanici per via degli elevati ingombri e delle economie di scala. Con l'evoluzione dei motori elettrici e a combustione interna la motorizzazione poté riguardare anche mezzi di trasporto di minori dimensioni: siamo agli inizi del Novecento e comincia l'era della motorizzazione individuale diffusa. Nel corso del secolo, a meno dei periodi dei grandi conflitti e delle crisi economiche mondiali, fu continua la crescita della mobilità delle persone sempre più legata all'uso dei veicoli privati e pubblici; assumono un ruolo importante prima il trasporto aereo a partire dagli anni '50 e poi il trasporto ferroviario ad alta velocità alla fine del secolo.

La seconda grande rivoluzione tecnologica dei trasporti del XX secolo è l'elettificazione del trasporto ferroviario, che sfrutta il vincolo della sede fissa per alimentare i motori elettrici dalle reti di distribuzione dell'elettricità, che vanno diffondendosi nei paesi più avanzati, permettendo di fornire un servizio di trasporto affidabile ed economico. Il motore elettrico è molto più efficiente di uno a combustione interna, senza considerare come l'energia che consuma sia prodotta, e per questo motivo ha rappresentato sin dagli albori della motorizzazione una possibile soluzione alla richiesta di mobilità. Su strada però ha incontrato da subito alcuni limiti come la disponibilità sul territorio di postazioni di ricarica, i limiti di autonomia, le modalità e i tempi di ricarica, i problemi di ingombro e di peso delle prime batterie. In ferrovia invece, con l'alimentazione diretta da rete, questi problemi sono stati da subito ovviati e solo recentemente, grazie ai forti progressi tecnologici del settore, si prospetta un uso maggiore dei motori elettrici anche su strada.

Nel XXI secolo il grande passo avanti per i trasporti è rappresentato dalla nascita e diffusione dei sistemi dell'Information and Communication Technology (ICT).

L'integrazione di questi nuovi sistemi ha portato delle conseguenze: lato domanda ha creato nuove esigenze di scambio di persone e beni e al tempo stesso ha però limitato la richiesta di mobilità grazie alla sostituibilità dei contatti fisici con quelli telematici; lato

offerta l'ICT ha permesso di avere sistemi più moderni ed efficienti e in un contesto dinamico come quello della mobilità anche potenzialmente in grado di rispondere in tempo reale alle esigenze della domanda.

2.2 Panoramica sui sistemi di trasporto pubblico locale

Questa tesi studierà la programmazione di un sistema di trasporto metropolitano ma prima di proseguire è bene fare una panoramica sui sistemi di trasporto pubblico urbano, questo allo scopo di capire le caratteristiche delle alternative di trasporto pubblico locale e anche per capire su che basi un pianificatore sceglie un mezzo rispetto ad un altro per rispondere ad una determinata domanda di mobilità.

È possibile definire tre principali categorie di trasporto pubblico locale più una per i sistemi più moderni: *trasporto stradale*, *trasporto semi-rapido*, *trasporto rapido* e *trasporto innovativo*.

Categorie	Tipologia	Capacità [passeggeri/h/senso di marcia]
Trasporto stradale convenzionale	- Bus - Tramvie - Filobus	500-5000
Trasporto semi-rapido	- Metropol. leggera - Tram su gomma	4000-20000
Trasporto rapido	- Metropol. Classica - Servizi metropolitani extraurb.	10000-60000
Trasporto innovativo	- Sistemi a guida automatica - Sistemi con trazione a fune	3000-20000

Figura 3 - Capacità orario per mezzo di trasporto

Con *trasporto stradale* intendiamo le tipologie di trasporto con minore velocità commerciale, quali bus, filobus e tram, che permettono di avere una piccola distanza tra le stazioni. Con *trasporto semi-rapido* intendiamo i mezzi che hanno capacità e velocità intermedie, quali metropolitane leggere, bus rapidi o tram su gomma, e che prevedono una distanza leggermente maggiore tra le fermate. Con *trasporto rapido* intendiamo mezzi più grandi che permettono di trasportare più utenti ad una maggiore velocità, quali metropolitane classiche e treni regionali, e che prevedono tratte anche di lunghezza elevata. Infine per *trasporto innovativo* intendiamo infrastrutture e mezzi che adottano sistemi di automazione come le metropolitane a guida automatica e gli Automated People Mover (APM) di derivazione funiviaria. Ogni tipo di trasporto ha delle caratteristiche differenti e può essere più o meno efficiente per una città a seconda delle dimensioni e delle necessità di quest'ultima. Per identificare il trasporto urbano adeguato ad una città è necessario far riferimento ad alcuni parametri: la *capacità oraria*, il cui valore aumenta con la capienza dei veicoli e con intervallo di passaggio minori; la *vicinanza delle fermate*, fattore che

influisce sull'accessibilità del servizio e sulla velocità commerciale dello stesso; la *frequenza del servizio*, primo indicatore di qualità per l'utente, influenzato dai due fattori precedenti e anche dalla disponibilità di mezzi di trasporto; la *sicurezza*, molto variabile in funzione della condivisione o meno della sede stradale con altri utenti (pedoni, autoveicoli e biciclette) e mezzi di trasporto; i *costi*, che ovviamente variano in base alle caratteristiche del mezzo di trasporto.

In generale al crescere dei costi e del livello tecnologico di un sistema di trasporto corrisponde un'offerta di mobilità maggiore. Se in piccole città è sufficiente avere linee di servizio bus, in contesti più importanti saranno opportuni dapprima sistemi di tipo tramviario e, se non sufficienti, anche sistemi di tipo metropolitano.

Per concludere, in grandi città ove la congestione stradale è un problema molto rilevante, e una città come Istanbul con 15 milioni di abitanti non può che ricadere in questa categoria, non vi è altra soluzione che puntare su sistemi metropolitani per mitigare il problema e in questo elaborato focalizzeremo l'attenzione proprio su questi sistemi.

2.3 La metropolitana

I sistemi di trasporto metropolitani hanno trainato la crescita delle grandi città dall'inizio del secolo scorso e ne hanno consentito l'espansione verso le vicine periferie, dando vita alle odierne metropoli.

Per sistema di trasporto metropolitano si intende quel servizio trasporto passeggeri che opera prevalentemente in ambiente urbano e che viaggia su sede riservata così da non subire nessuna interferenza esterna da parte di traffico veicolare e pedonale.

Queste caratteristiche hanno permesso a tali sistemi di garantire alte capacità di carico, puntualità, affidabilità, sicurezza e basso consumo energetico, battendo su tutti questi aspetti le alternative di trasporto pubblico locale (autobus, filobus e tram), svolgendo quindi un ruolo vitale nel mitigare la congestione stradale e promuovendo così lo sviluppo economico della città.

La metropolitana nasce intorno al 1860 a Londra allo scopo di mettere in comunicazione le varie stazioni ferroviarie della città ed essendo un sistema di derivazione ferroviaria all'epoca adoperava motori a vapore viaggiando prevalentemente in superficie o in trincea, alternando tratti sotterranei di limitata estensione e comunque a livelli superficiali.

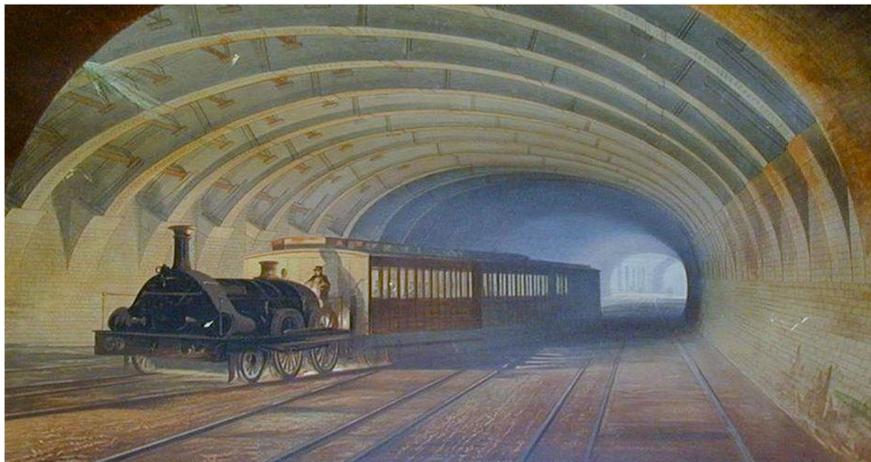


Figura 4 - Illustrazione di un treno a Praed Street Junction, Londra 1863

Solo alla fine del secolo, grazie all'elettrificazione del trasporto ferroviario, la metropolitana comincia ad assumere le caratteristiche che oggi conosciamo, prediligendo percorsi integralmente sotterranei e profondi, ora possibili grazie al motore elettrico, così da servire le zone più densamente abitate delle città. Nel corso del '900 le più importanti

città del mondo adottano questa nuova tecnologia per il trasporto rapido di massa e ne traggono linfa vitale per il loro sviluppo, Londra in primis ma anche Parigi, New York e più avanti le grandi metropoli asiatiche come Shanghai, Pechino e Tokyo.

Nel corso del secolo sono state proposte numerose varianti alla metropolitana sotterranea, spesso adoperanti infrastrutture più snelle e a cielo aperto, molte delle quali ricadono nella definizione di monorotaia, che sia essa con veicoli appesi o appoggiati, e prevede una struttura composta da una trave in cemento armato su cui si ancora il veicolo. Sono sistemi che hanno trovato impiego in contesti particolari, come alcune città asiatiche, e di nicchia come parchi tematici o fiere espositive, vedi il sistema Alweg di Torino costruito per la Fiera Internazionale del Lavoro del 1961 e poi dismesso nel 1963.

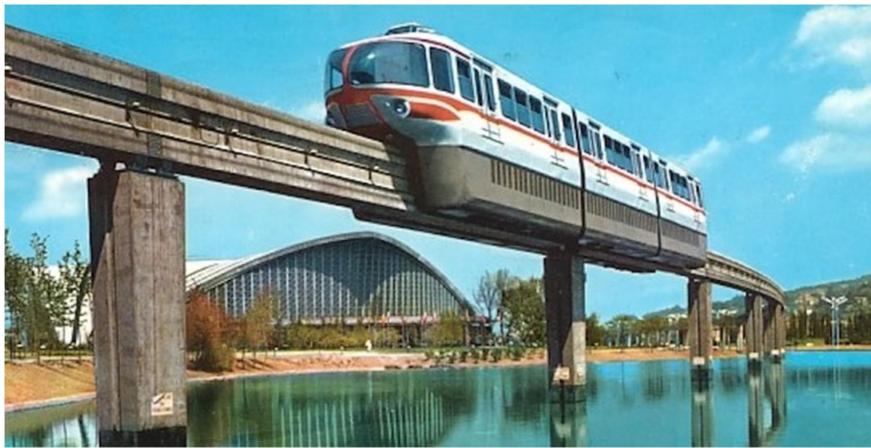


Figura 5 - Monorotaia di tipo Alweg, Torino 1961

Negli anni '80 arriva una nuova generazione di sistemi di trasporto metropolitani che adottano l'automazione integrale: uno di questi è il VAL (sigla di *Véhicule Automatique Léger*) sviluppato in Francia e installato per la prima volta a Lille nel 1983.

L'automazione permette frequenze molto più alte, non raggiungibili con i sistemi classici con conducente; inoltre il VAL adottò ruote di gomme consentendo maggiori prestazioni cinematiche e migliorando notevolmente comfort e sicurezza.



Figura 6 - Vettura VAL 208 della Metropolitana di Torino

Rispetto ai sistemi classici, una metro automatica è contraddistinta da larghezze di scavo più contenute e da veicoli più piccoli con conseguente minor costo al km per la costruzione della linea (si pensi che una metro tradizionale costa circa 100 milioni di € al km mentre una automatica arriva a costarne qualche decina).

Sempre di più nel mondo si opta per soluzioni con automazione integrale, nonostante questi sistemi siano in grado di offrire minori capacità orarie rispetto ai sistemi tradizionali, per via delle minori dimensioni dell'infrastruttura e dei convogli. I vantaggi però sono molteplici: alta frequenza del servizio, alta affidabilità e sicurezza, minor costo per l'investimento iniziale e per il personale, oltre alla maggior flessibilità e scalabilità del servizio, anche in tempo reale.

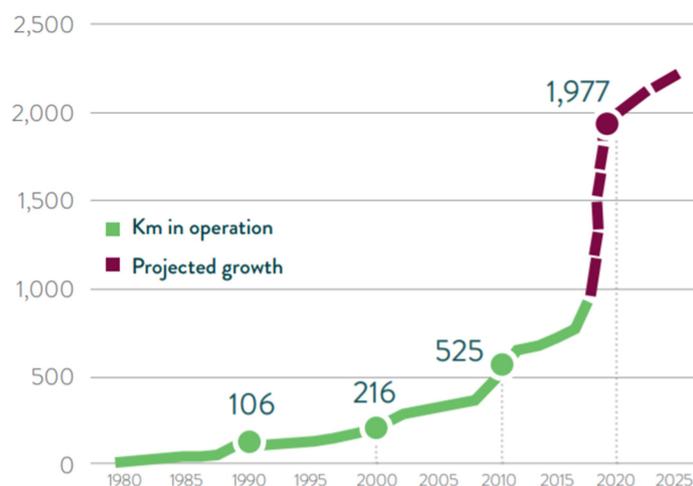


Figure 11: Total growth in automated metros (km of lines operated in full automated mode)

Figura 7 - Crescita delle metro automatiche nel mondo (km di linee)

Le metropolitane automatiche vengono classificate in una serie di livelli di automazione detti GoA, *grade of automation*. Questi definiscono quanto l'automazione sia presente e quanto essa sia in grado di sostituire l'operato del personale, sia di bordo sia quello a terra. Il più avanzato sistema di automazione è rappresentato dal livello GoA4 il quale prevede la totale assenza di personale a bordo per tutte le fasi (marcia del treno, partenza e arrivo in stazione, apertura e chiusura porte). Tale standard richiede un supporto tecnologico che permetta un continuo scambio di informazioni treno-infrastruttura-centrale di controllo, ciò è garantito dal sistema CBTC (Communication Based Train Control). Tale sistema consente di localizzare e comandare i treni dalla centrale di controllo e si basa su tre sottosistemi che a loro volta definiscono il livello di automazione dell'infrastruttura:

- ATP (Automatic Train Protection) è il sistema in grado di garantire la marcia in sicurezza dei treni adottando un controllo sul distanziamento e sulla velocità. Nei caso ove le prescrizioni non venissero rispettate il sistema è in grado di attuare la frenata di emergenza;
- ATO (Automatic Train Operation) è il sistema in grado di controllare la marcia dei veicoli, sostituendo a tutti gli effetti il macchinista, riuscendo a seguire autonomamente le prescrizioni definite dall'ATP;
- ATS (Automatic Train Supervision) è il sistema che supervisiona e garantisce il rispetto dell'intero orario grafico;
- ATC (Automatic Train Control) è il sistema che comprende al suo interno i precedenti tre e permette la scelta dinamica dell'orario grafico e dei parametri di marcia del treno adattandosi alla domanda e ad eventuali perturbazioni.

I sistemi sopra citati fanno capo al centro di controllo operativo usualmente situato lungo la linea o ad un capolinea della stessa.

Questi sistemi di trasporto sono indubbiamente il futuro della mobilità nelle grandi e medie città e rappresentano una svolta sotto l'aspetto dei consumi energetici e delle emissioni rispetto al passato.

Adottando però una visione più ampia si può affermare che i sistemi metropolitani, classici e automatici, per quanto efficienti e innovativi, abbiano un impatto importante nel consumo delle risorse di una città, perchè la mole di persone che trasportano richiede un grande dispendio energetico e questo non può essere trascurato.

Inevitabilmente il consumo complessivo di energia delle linee metropolitane è cresciuto come naturale conseguenza della crescita del chilometraggio di tali sistemi (crescita che non si arresterà, soprattutto per le metro automatiche) e nonostante i treni non producano direttamente emissioni inquinanti non si può ignorare il processo produttivo dell'energia elettrica che fa ancora affidamento in buona parte a fonti non rinnovabili (in Europa nel 2016 solo il 13.2% del consumo annuo deriva da fonti rinnovabili, in Italia il 16.8% e in Turchia il 12.3%³). Inoltre, come già detto, nonostante le Metropolitane siano sistemi di trasporto molto efficienti se comparati con le alternative di trasporto pubblico ed ancor di più con il trasporto privato in auto, è rilevante notare che una singola linea metropolitana può consumare circa 40 milioni di kW/h all'anno, di cui circa la metà consumati solo nelle fasi di accelerazione, che equivalgono alla domanda di energia elettrica di 22000 edifici residenziali⁴.

Non c'è quindi solo l'interesse del gestore dell'infrastruttura verso la diminuzione dei consumi energetici ma c'è un interesse comune che riguarda l'uso corretto ed intelligente delle risorse per limitare l'inquinamento ambientale.

³ Statistiche sull'energia rinnovabile, EUROSTAT 2016 [b]

⁴ Dati riferiti al 2012, Pechino, Yang, Chen, Ning & Tang, 2017

2.4 Il consumo energetico nei sistemi di trasporto a impianto fisso

Negli ultimi anni si sente sempre più spesso parlare di sostenibilità e rispetto dell'ambiente, temi di importanza sociale ed economica che sono divenuti valori fondamentali non solo per i singoli cittadini ma soprattutto per la gestione dei sistemi urbani. A tal proposito, l'Unione Europea si è trovata a discutere di politica energetica al fine di migliorare l'efficienza e la sostenibilità dei sistemi di trasporto definendo delle linee guida disponibili nel "Piano di Azione per la Mobilità Urbana" [c] e nel "Libro Bianco sui Trasporti". Gli obiettivi principali sono: la riduzione delle emissioni di gas serra, il miglioramento dell'efficienza energetica dei veicoli attraverso l'uso di sistemi e carburanti sostenibili, l'ottimizzazione del trasporto interurbano multimodale, e, non per ultimo, l'incremento dell'uso di modi di trasporto più efficienti sotto il profilo energetico e tra questi rientrano i sistemi ad impianto fisso quali la ferrovia, la metropolitana e gli APM (Automated people mover).

Come riportato nel Libro Bianco sui Trasporti:

*"[...] La sfida consiste nell'interrompere la dipendenza del sistema dei trasporti dal petrolio, senza sacrificarne l'efficienza e compromettere la mobilità. In linea con l'iniziativa faro "Un'Europa efficiente sotto il profilo delle risorse", [...] l'obiettivo primario della politica europea dei trasporti è quello di contribuire a realizzare un sistema che sostenga il progresso economico europeo, rafforzi la competitività e offra servizi di mobilità di elevato livello, garantendo allo stesso tempo un uso più efficace delle risorse. In pratica i trasporti devono utilizzare meno energia ed energia più pulita, impiegare più efficacemente un'infrastruttura moderna e ridurre il loro impatto negativo sull'ambiente e su elementi fondamentali del patrimonio ambientale quali acqua, terra ed ecosistemi."*⁵

Sappiamo che il trasporto urbano è responsabile di circa un quarto delle emissioni di CO₂ del settore dei trasporti, quindi la graduale eliminazione dall'ambiente urbano dei veicoli "alimentati con carburanti convenzionali"- ovvero che impiegano motori non ibridi a combustione interna - è uno dei fattori che contribuiscono alla riduzione della dipendenza dal petrolio e delle emissioni di gas serra. Aumentando gli spostamenti con i mezzi di

⁵ Libro Bianco sui Trasporti, pag. 6

trasporto collettivi, sarà possibile aumentare la densità e la frequenza del servizio, generando così un circolo virtuoso per i modi di trasporto pubblici.

In Europa, ad esempio, il settore dei trasporti incide sul bilancio energetico totale di circa il 31%.

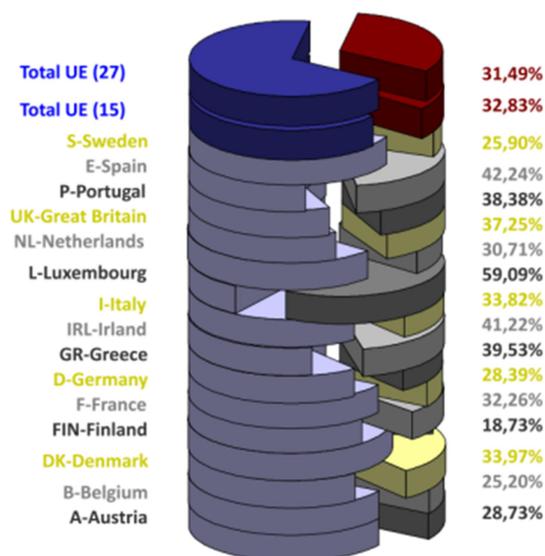


Figura 8 - Impatto dei consumi energetici dei trasporti sui consumi totali in UE, 2006⁶

Analizzando le quote di energia utilizzata nel settore dei trasporti, la modalità più sostenibile dal punto di vista dei consumi risulta essere quella ferroviaria: infatti, nonostante il settore dei trasporti utilizzi per lo più mezzi a carburante di derivazione petrolifera, la ferrovia resta la modalità energeticamente più efficiente con solo l'1% dei consumi del settore trasporti, mentre il trasporto stradale, marittimo e aereo assorbono rispettivamente circa il 94%, 3% e 2%. Il trasporto ferroviario, così come quello metropolitano classico, per la sua caratteristica di resistenza al rotolamento ruota-rotaia inferiore a quella pneumatico-asfalto dei veicoli stradali, presenta un consumo energetico per passeggero/km minore. Solo recentemente in ambito ferroviario, con l'avvento delle linee ad alta velocità/capacità percorse da treni che raggiungono anche i 300 km/h, si è prestata attenzione a tecniche di contenimento energetico.

L'energia utilizzata per l'esercizio da un sistema ad impianto fisso dipende da: carico trasportato, caratteristiche strutturali e funzionali dei rotabili, peculiarità della linea in questione (pendenza, tortuosità, condizioni di manutenzione dell'infrastruttura), condizioni

⁶ Energia e petrolio in Italia, EUROSTAT

ambientali e infine profilo di velocità assunto durante l'esercizio che, se ottimizzato, comporta una significativa riduzione dei consumi.

I parametri su cui poter intervenire sono sicuramente le caratteristiche fisiche dei convogli (masse e resistenze aerodinamiche), i sistemi di condizionamento e illuminazione delle carrozze, efficienti interventi manutentivi, il recupero dell'energia in fase di frenatura nonché azioni tese ad ottimizzare il profilo di marcia.

Sui primi tre fattori si può intervenire esclusivamente in fase di progettazione del materiale rotabile, specie nei nuovi convogli ferroviari adatti ai sistemi ad alta velocità, su cui si è posta molta attenzione agli aspetti aerodinamici e di contenimento della massa.

Per quanto riguarda l'esercizio, i punti su cui intervenire per limitare i consumi riguardano il recupero energetico nella fase di frenatura elettrica e un'attenta definizione delle tracce orarie. La frenatura elettrica è caratterizzata dall'uso del motore, in tale fase del moto, come generatore. A meno di equipaggiare i treni con dispositivi di accumulo dell'energia recuperata, tale guadagno energetico potrà essere utilizzato solo da treni in accelerazione che percorrono lo stesso tratto di linea o, in alternativa, da accumulatori utilizzabili da veicoli a ricarica elettrica presso le aree di interscambio per i passeggeri pendolari; con accorgimenti di questo genere la frenatura elettrica può vedere allargarsi il suo range di utilizzo a discapito della frenatura meccanica, che potrà essere limitata all'ultimo tratto prima dell'arresto o alla frenatura di emergenza.

La gestione dell'esercizio deve tenere conto di molteplici obiettivi, spesso in contrasto fra loro, come i tempi di percorrenza, il consumo energetico e il comfort percepito [10].

Problemi di questo tipo sono molto complessi da risolvere e spesso i gestori delle infrastrutture adottano soluzioni che prediligono un aspetto a discapito di un altro.

Allo scopo di individuare una soluzione che sia la migliore sotto tutti i punti di vista, nel Capitolo 3 verrà adottato un algoritmo genetico in un processo di ottimizzazione multi-obiettivo.

2.5 Meccanica della locomozione

L'algoritmo sviluppato in questa tesi, esposto nel capitolo 3, deve fare affidamento a diverse nozioni dell'ingegneria dei trasporti per giungere alla soluzione richiesta. Ad esempio deve suddividere il moto del treno nelle diverse fasi che lo compongono e deve calcolare le velocità e i tempi di percorrenza. I vari aspetti da considerare, tutti inerenti alla meccanica della locomozione, sono di seguito esposti.

2.5.1 Equazione del moto

Per simulare le prestazioni di un sistema di trasporto occorre partire dall'analisi di un singolo veicolo che si muove su un determinato percorso e sulla quale agiscono forze di diversa natura.

Le forze agenti sul veicolo sono le seguenti:

- Forze attive F , corrispondenti alle forze di trazione generate dai motori di bordo o da altri veicoli;
- Forze passive R , corrispondenti alle forze di resistenza che si oppongono al moto stesso.

Assumendo il veicolo come un punto materiale di massa M si può scrivere l'equazione del moto dalla prima legge della dinamica:

$$F - R = M \frac{dv}{dt} \quad (1)$$

in cui v è la velocità e dv/dt è l'accelerazione puntuale.

L'equazione del moto (1) ci dice che per conferire al veicolo un'accelerazione positiva occorre applicare una forza F maggiore delle resistenze R .

2.5.2 Sforzo di trazione e fenomeno dell'aderenza

Il valore che F può assumere dipende dall'aderenza che si crea fra la ruota e l'infrastruttura e dalla potenza fornita alle ruote. Si può affermare che il moto del veicolo ha luogo quando le ruote motrici riescono ad agire in regime di rotolamento ed evitare quanto più il regime di strisciamento. Questo è garantito dal fenomeno dell'aderenza che agisce sulla superficie di contatto ruota-infrastruttura e che permette la trasmissione, da parte delle ruote motrici,

sia di una forza normale alla superficie, definita *forza peso* P , sia una forza tangenziale nella direzione del moto, detta T .

Affinché il moto abbia luogo occorre sufficiente potenza alle ruote (W_r) e occorre che questa sia trasmessa a terra attraverso la forza T in regime di puro rotolamento. Per fare ciò non bisogna eccedere il *limite di aderenza* (T_{max}), ovvero il valore massimo della forza T applicabile all'area di contatto ruota-infrastruttura senza che si rompa il legame di aderenza fra le superfici in contatto e si verifichino quindi slittamenti. Il valore di T_{max} è proporzionale, secondo un coefficiente f_{ad} definito *coefficiente di aderenza*, al peso aderente $P_{aderente}$ che grava sulla ruota motrice:

$$T_{max} = f_{ad} \cdot P_{aderente} \quad (2)$$

Il valore del coefficiente di aderenza f_{ad} dipende da diversi fattori, quali: la velocità di esercizio del materiale rotabile, la tipologia dei materiali a contatto (via di corsa e ruote del veicolo), le condizioni di pulizia e di umidità delle superfici, funzione anche delle condizioni ambientali, e infine il peso aderente.

Per il caso ferroviario, avendo in genere masse comprese fra le 12 e le 22 tonnellate, la dipendenza dal peso aderente può essere trascurata. Si fa spesso affidamento al grafico riportato in figura 9, di origine sperimentale, che esprime la dipendenza di f_{ad} dai soli parametri velocità e condizioni di umidità.

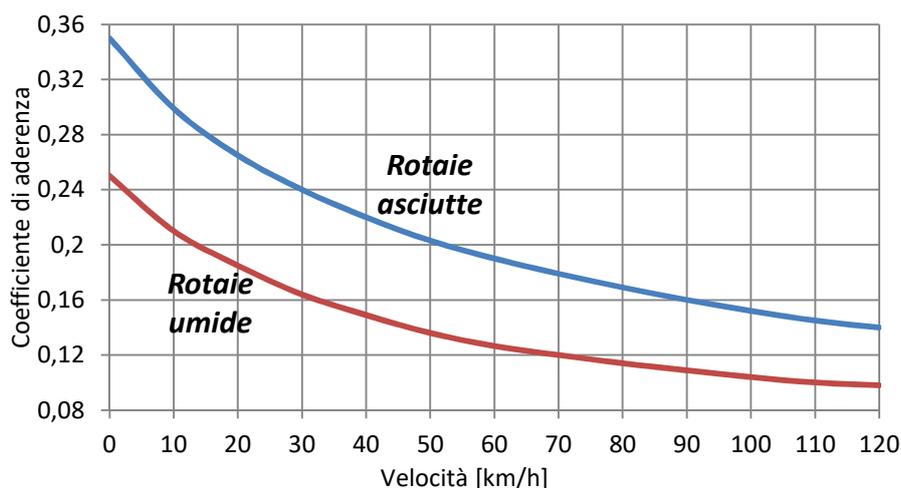


Figura 9: Valori medi dei coefficienti di aderenza in campo ferroviario [10]

Per quanto riguarda la potenza W_r , la figura 10 descrive la relazione fra quest'ultima, la coppia motrice applicata alla ruota di trazione M_r e la forza T trasmessa all'interfaccia ruota-sostegno.

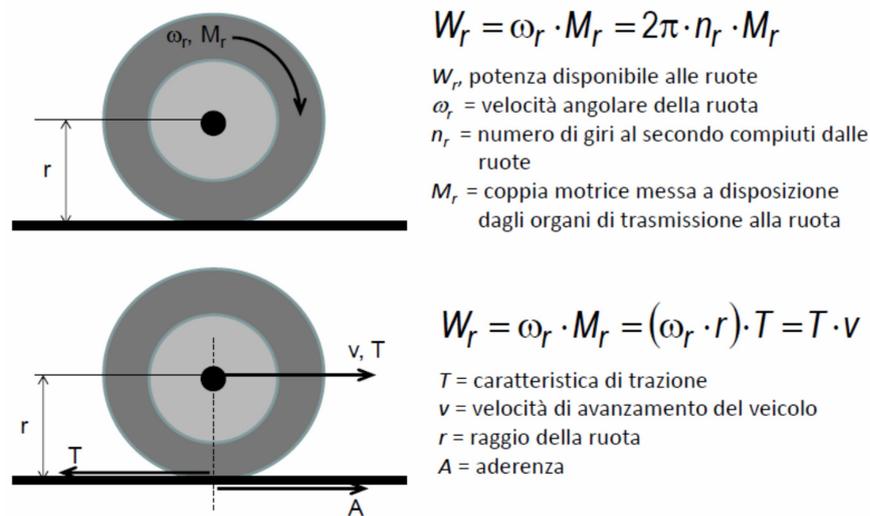


Figura 10: Relazioni fra potenza, coppia motrice e trazione [11]

2.5.3 Resistenze al moto

Nell'equazione del moto il termine R rappresenta le *resistenze* o *forze passive* e rappresenta le forze che si oppongono al moto del veicolo. Queste sono la risultante di diversi contributi e vengono riassunte nella seguente espressione:

$$R = R_{ord} + R_{acc} = (R_{rot} + R_{aer}) + (R_i + R_c) \quad (3)$$

dove:

- R_{ord} rappresenta le *resistenze ordinarie* e comprende quelle sempre presenti nel moto del veicolo, anche quando questo viaggia in rettilineo e su livellette a pendenza nulla. Ne fanno parte la resistenza al rotolamento e quella aerodinamica.
- R_{acc} rappresenta le *resistenze accidentali* e comprende le resistenze dovute alle caratteristiche plano-altimetriche del tracciato, vale a dire la resistenza dovuta alla pendenza e quella dovuta alle curve.

Verranno ora analizzate tutte le componenti dell'espressione (3).

2.5.3.1 Resistenze ordinarie

Ne fanno parte la resistenza al rotolamento e quella aerodinamica. La prima è a sua volta composta, nel caso ferroviario, dal contributo della coppia cinematica perno dell'assile-boccola/cuscinetto e dalla coppia ruota-rotaia. Per i veicoli ferroviari si hanno valori medi di *resistenza specifica al rotolamento* (generalmente riferiti all'unità di massa ed espressi come [kg/t], [N/N], [N/kN] o in ‰) dell'ordine di poche unità per mille, questo significa che bastano dai 1.5 (per un moderno treno passeggeri) ai 9 kg (per un treno merci datato) per trainare ogni tonnellata di un treno.

La resistenza al rotolamento viene calcolata semplicemente moltiplicando il valore di resistenza unitaria per il peso del treno:

$$R_{rot} = r_{rot}P [N] \quad (4)$$

Si riportano in tabella 1 i valori di resistenza unitaria al rotolamento medi per veicoli ferroviari e stradali.

Veicolo	Resistenza specifica al rotolamento r_{rot} [N/N]
Treni e convogli ferroviari	0,002÷0,005
Autovettura su pavimentazione in calcestruzzo	0,015÷0,070
Autovettura su superficie sabbiosa	0,3
Autocarro su pavimentazione in calcestruzzo	0,045÷0,0075

Tabella 1: Valori di resistenza unitaria medi per veicoli ferroviari e stradali [10]

La resistenza aerodinamica è invece dovuta alla massa d'aria che investe un veicolo in moto ed è anch'essa composta da diversi contributi dovuti alla testata del veicolo (effetto dovuto alla pressione esercitata su di essa), alle pareti laterali (dovuto alla resistenza delle pareti) e alla coda (zona in cui si genera una depressione).

Il calcolo della resistenza aerodinamica è generalmente effettuato tramite la formula semplificata di Newton:

$$R_{aer} = \frac{1}{2} \rho C S v^2 [N] (5)$$

dove:

- ρ è la densità dell'aria compresa fra 1.22 e 1.29 $Nm^{-4}s^2$ e variabile in base a pressione e temperatura;
- C è il coefficiente di forma del veicolo, compreso fra 0.4 e 0.5 per veicoli ferroviari;
- S è la superficie frontale del veicolo espressa in m^2 (superficie investita dall'aria proiettata su un piano normale alla direzione del moto) e generalmente compresa fra 7 e 10 m^2 per veicoli ferroviari;
- v è la velocità del veicolo espressa in m/s ;

Vi sono altre fattori in campo ferroviario che contribuiscono alle resistenze e che rendono incompleti i calcoli teorici sopra detti. La presenza di gallerie è uno fattore che andrebbe considerato, così come la composizione di treni con materiale disomogeneo. A questo scopo vi sono numerose prove sperimentali che forniscono formulazioni empiriche utili a considerare ogni aspetto, le più comuni sono (fonte [10]):

- Formula binomia $r_{ord} = a + bV^2 [N/kN]$
- Formula trinomia $r_{ord} = a + bV + cV^2 [N/kN]$
- Formule globali (FS) $2 + 2,8 \left(\frac{V}{100}\right)^2$ per treni passeggeri
 $2,5 + 4 \left(\frac{V}{100}\right)^2$ per tramvie e metropolitane

2.5.3.2 Resistenze accidentali

Sono dovute alle caratteristiche plano-altimetriche e comprendono la resistenza dovuta alla pendenza e quella dovuta alle curve.

La prima ha luogo quando un veicolo viaggia su un piano inclinato di un angolo α ; questo genera una resistenza data dalla componente della forza peso P in direzione del piano inclinato, vedi Figura 11.

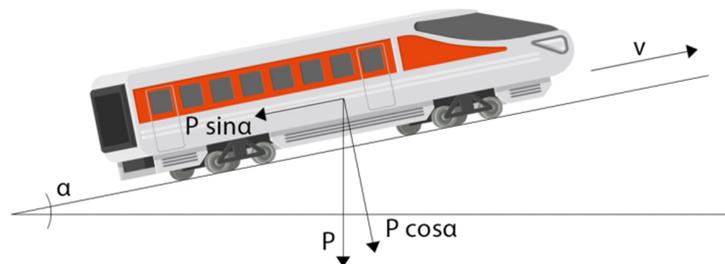


Figura 11: Scomposizione forza peso per un veicolo su tratto in pendenza

In genere si hanno pendenze contenute e si può confondere il seno dell'angolo con la tangente:

$$i = \tan \alpha \approx \sin \alpha$$

Conseguentemente la resistenza unitaria, espressa in kg/t o n/kN, coincide con la pendenza i espressa in ‰:

$$R_i = P * r_i = P \tan \alpha = P i$$

Infine vi è la resistenza dovuta alle curve, causata dagli strisciamenti fra binari e ruote. La solidarietà delle ruote rispetto all'asse (parallelismo della sala montata) genera in curva degli attriti tra il fungo del binario e il bordino della ruota. Inoltre la ruota esterna deve percorrere una distanza maggiore rispetto a quella interna e benché la conicità della ruota compensi tale problema, questo provoca comunque un aumento della resistenza al moto. In genere possiamo dire che il valore di resistenza al moto in curva è correlato al coefficiente

di attrito ruota-rotaia, al valore dello scartamento, al peso gravante sulle ruote e al raggio del binario in curva. Il valore di resistenza unitario è spesso espresso tramite formulazioni sperimentali, la più usata è quella di Von Röckl:

$$r_c = \frac{a}{R - b} [N/kN]$$

dove:

- R è il raggio della curva espresso in metri;
- a e b sono costanti dipendenti dal raggio di curvatura e dallo scartamento, vedi tabella 2.

Scartamento [mm]	Raggio [m]	a	b
1435	≥850	0,650	55
	250÷350	0,650	65
	150÷250	0,650	30
1000	≥60	0,500	30
900	≥60	0,380	17
750	≥40	0,380	10

Tabella 2: Valori delle costanti a e b della formula di Von Röckl [10]

2.5.4 Fasi del moto

Definiti i fattori che intervengono nel moto di un treno, vediamo ora come il moto stesso sia costituito da diverse fasi, ognuna delle quali definita dalla medesima equazione del moto (1), a meno dei segni delle componenti di tale equazione.

Le fasi del moto, con le relative equazioni del moto, sono le seguenti, riassunte in tabella 3:

Fase	Equazione del moto	Accelerazione	Forze
Accelerazione o avviamento	$F - R = M_e \frac{dv}{dt}$	$\frac{dv}{dt} > 0$	$F > 0$ $R \neq 0$
Regime	$F = R$	$\frac{dv}{dt} = 0$	$F = R$
Coasting o marcia inerziale	$-R = M_e \frac{dv}{dt}$	$\frac{dv}{dt} < 0$	$F = 0$ $R \neq 0$
Frenatura	$-F - R = M_e \frac{dv}{dt}$	$\frac{dv}{dt} < 0$	$F < 0$ $R \neq 0$

Tabella 3: Caratteristiche delle fasi del moto

Nel movimento fra una stazione e la successiva necessariamente dovranno essere presenti le fasi di accelerazione e di frenatura, non sempre invece intervengono le fasi di marcia a regime e di marcia inerziale. La presenza della fase di marcia a regime dipenderà dal distanziamento tra fermate successive poiché per raggiungere la velocità di *crociera*, che coincide spesso con la velocità massima ammessa sull'infrastruttura, occorrerà avere a disposizione sufficiente spazio, il quale non è sempre garantito. La fase di marcia inerziale è anch'essa correlata alla distanza fra fermate consecutive ma è una componente opzionale del moto, a discrezione del programmatore del servizio. Spesso è uno dei parametri che permette strategie alternative a quella delle massime prestazioni del sistema di trasporto: se, ad esempio, nell'ora di punta il programmatore del servizio dovrà richiedere al sistema di trasporto le massime prestazioni possibili (imponendo la massima accelerazione allo

spunto, la fase di regime a velocità massima per il maggior tempo possibile e la frenatura più intensa), nei momenti in cui la domanda diminuisce e non occorre spingere il sistema al suo massimo, chiaramente si può pensare a strategie differenti in cui le accelerazioni sono più contenute, la fase a regime ha una durata minore e si può valutare l'inserimento della fase di marcia inerziale nella quale si sfruttano le basse resistenze al rotolamento dei sistemi ferroviari per mantenere una buona velocità nonostante si annulli il consumo energetico dovuto allo sforzo di trazione.

Il percorso di un treno fra due stazioni, e di conseguenza anche le diverse fasi del moto, sono comunemente rappresentati attraverso grafici bidimensionali che mettono in relazione lo spazio percorso con la velocità oppure il tempo di percorrenza con la velocità. La figura 12 ne è un esempio:

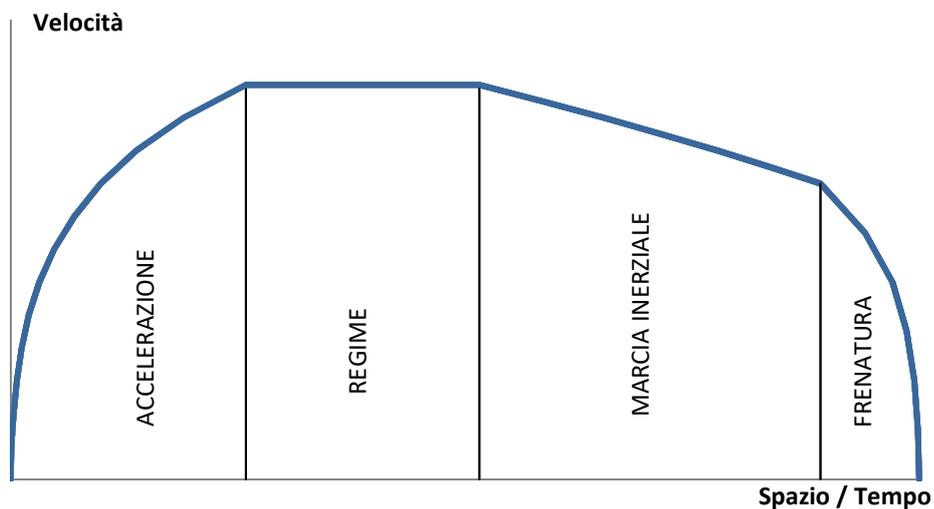


Figura 12: Diagramma del moto con indicazione delle fasi

L'algoritmo sviluppato in questo studio fa riferimento, come già detto, all'equazione del moto (1) e alla cinematica del moto uniformemente accelerato per individuare tutte le grandezze in gioco durante il movimento del treno: spazio percorso, tempo di percorrenza, velocità, accelerazione, resistenze al moto e sforzo di trazione richiesto.

Si allegano in tabella 4 le diverse equazioni cinematiche utilizzate dall'algoritmo:

Equazioni cinematiche del moto uniformemente accelerato	
Velocità	$v_i = v_{i-1} + a(t_i - t_{i-1})$
Legge oraria	$x_i = x_{i-1} + v_{i-1}(t_i - t_{i-1}) + \frac{1}{2}a(t_i - t_{i-1})^2$
Velocità con $t_0=0$ e $v_0=0$	$v = at$
Legge oraria con $t_0=0$ e $v_0=0$	$x = \frac{1}{2}at^2$
Equazione senza il tempo	$v_i^2 = v_{i-1}^2 + 2a_{i-1}(x_i - x_{i-1})$

Tabella 4: Equazioni cinematiche del moto uniformemente accelerato

Di seguito verranno analizzate nel dettaglio le varie fasi del moto.

2.5.4.1 Accelerazione o avviamento

La fase di accelerazione o avviamento consiste nella fase iniziale del moto in cui si applica al veicolo una accelerazione, intesa come variazione di velocità nel tempo dv/dt , positiva tramite i motori di bordo. In genere si possono raggiungere valori di accelerazione massimi di circa 1-1.2 m/s² anche se in esercizio si adottano valori leggermente minori.

Nel caso studio si adotteranno valori di esercizio pari a 0.8 m/s² nonostante il sistema possa arrivare fino a 1 m/s². Questa scelta è dettata da più fattori quali il comfort di viaggio, il contenimento dei consumi e, non ultima, la possibilità di aumentare le prestazioni sino ai massimi valori di accelerazione in situazioni in cui si voglia recuperare un ritardo accumulato o intensificare l'intervallo di passaggio fra i treni.

L'algoritmo sviluppato in questo studio fa riferimento alla cinematica del moto uniformemente accelerato per individuare tutte le grandezze in gioco durante il movimento del treno: spazio percorso, tempo di percorrenza e velocità.

2.5.4.2 Regime

La fase di regime (*cruising* in inglese) o marcia a velocità costante è la fase del moto in cui vi è accelerazione nulla ($dv/dt = 0$). Questo implica uno sforzo di trazione uguale alla somma delle resistenze al moto presenti a quella velocità.

Tale fase sarà presente solo quanto il distanziamento tra fermate consecutive è maggiore della distanza necessaria al treno per raggiungere la velocità massima. In questa fase l'algoritmo fa uso delle seguenti equazioni semplificate, assumendo la velocità costante :

Equazioni cinematiche del moto a velocità costante	
Legge oraria con $a=0$	$x_i = x_{i-1} + v_{i-1}(t_i - t_{i-1})$
	$(t_i - t_{i-1}) = x_{i-1} + \frac{(x_i - x_{i-1})}{v}$

Tabella 5: Equazioni cinematiche del moto a velocità costante

2.5.4.3 Coasting o marcia inerziale

La fase di coasting o marcia inerziale è quella fase in cui si arresta il contributo dei motori di bordo (si annulla la forza di trazione, $F=0$) e si fa avanzare il veicolo per inerzia, sfruttando la ridotta resistenza al rotolamento tipica dell'infrastruttura ferroviaria.

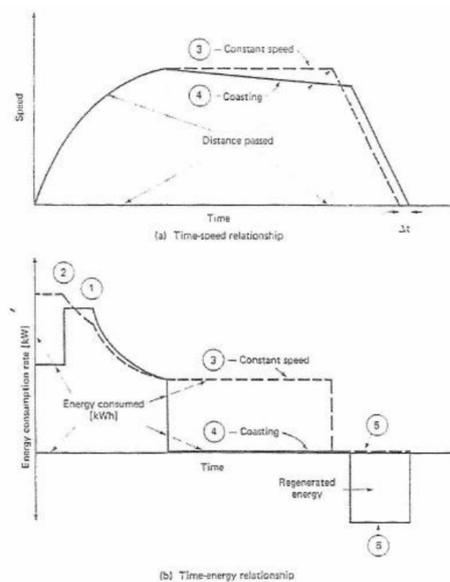


Figura 13: Consumi energetici con e senza fase di coasting [14]

Come anticipato all'inizio del paragrafo questa fase è molto preziosa e può venire in aiuto del programmatore del servizio di trasporto il quale, con un piccolo sacrificio in termini di velocità di marcia e con un aumento del tempo di percorrenza relativamente contenuto, può raggiungere ottimi risultati per quanto riguarda il contenimento dei consumi energetici. Questo è un approccio utile in condizioni di esercizio ordinario come nelle ore di punta, situazioni in cui si adotta una durata del coasting non elevata così da avere un piccolo risparmio di energia. Un vantaggio energetico maggiore lo si può ottenere invece in presenza di bassa domanda, situazione nella quale si amplifica la durata del coasting e di conseguenza si accetta un aumento del tempo di percorrenza (e quindi minor velocità commerciale). L'aumento della durata del coasting può essere combinato con un'altra strategia tipica delle condizioni di morbida, cioè la diminuzione del numero di treni presenti sull'infrastruttura, così da ottenere un ingente risparmio in termini di consumi complessivi.

Come si può vedere in figura 13 dopo la fase di accelerazione è possibile seguire due approcci differenti: tenere la velocità costante (così facendo anche il consumo energetico sarà costante) oppure adottare il coasting grazie alla quale si otterrà una notevole riduzione dei consumi a fronte di un piccolo incremento del tempo di percorrenza.

Il grafico mostra inoltre il vantaggio derivante dalla frenata elettrica con rigenerazione di energia, che comporta un consumo energetico negativo ovvero una reimmissione di energia in linea a disposizione di un altro treno e per l'alimentazione di impianti e servizi.

2.5.4.4 Frenatura

La fase di frenatura è l'ultima fase del moto nella quale sia i meccanismi di bordo (che sia l'impianto frenante o i motori elettrici) sia le resistenze si oppongono alla marcia del treno, provocando così una accelerazione negativa ($dv/dt < 0$).

Nei sistemi ferroviari tradizionali la frenata è completamente a carico dell'impianto frenante, di conseguenza l'energia del moto viene trasformata in calore per via dello strisciamento delle pastiglie sui dischi o dei ceppi sulle ruote, a seconda della tipologia di impianto.

Nei moderni sistemi a trazione elettrica, sia in campo ferroviario che metropolitano, grazie all'evoluzione tecnologica del materiale rotabile si possono adottare strategie differenti in

fase di frenata. Se in fase di accelerazione i motori elettrici utilizzano energia per generare il movimento del veicolo, in frenata si inverte il loro funzionamento e si utilizzano come generatori di energia sfruttando il movimento dell'albero motore a cui sono collegati. Questa viene definita *frenata elettrica o rigenerativa* e comporta diversi vantaggi: si limita l'usura dell'impianto frenate e i relativi costi di manutenzione, si amplifica la capacità frenante del convoglio (la frenata può essere contemporaneamente sia elettrica che meccanica, oppure alternata) e soprattutto si recupera energia elettrica altrimenti dispersa. Questa energia può essere immessa nella rete elettrica e messa a disposizione di altri treni in trazione oppure può essere accumulata a bordo attraverso batterie o condensatori.

In ambito ferroviario esistono situazioni in cui si è obbligati a utilizzare treni con motori a combustione interna, molto meno efficienti dei parenti a trazione elettrica, e si deve abbandonare forzatamente questa strategia di frenata. In Italia infatti è comune avere delle tratte ferroviarie non elettrificate che portano a questa soluzione e che pregiudicano quindi l'utilizzo di materiale rotabile più moderno.

Come detto prima, l'energia recuperata in frenata può essere messa a disposizione di altri treni oppure immagazzinata a bordo; quest'ultima opzione è poco utilizzata ed è al momento prevalentemente un argomento di ricerca oggetto di molta attenzione, specie negli ultimi anni, come evidenziato nel paragrafo 2.2 riguardante le ricerche scientifiche presenti in letteratura.

La prima opzione invece, cioè la reimmissione in rete dell'energia recuperata, è una soluzione applicabile e con buoni risultati, che però vede una grande limitazione al proprio utilizzo dovuta alla necessità, per il treno che intende usare l'energia recuperata, di essere nella stessa porzione di infrastruttura del treno in frenata, in particolare deve essere alimentato dalla stessa sottostazione elettrica. Quando questo non accade, l'energia recuperata viene dissipata tramite appositi apparati, disposti lungo l'infrastruttura, che generano calore e disperdono l'energia.

Risulta molto importante la frenata rigenerativa in infrastrutture soggette a traffico molto intenso, ove il grande numero di veicoli presenti contemporaneamente, soprattutto nelle ore di punta, porta a un tasso di utilizzazione dell'energia recuperata molto alto. In questi casi si può arrivare a risparmi energetici complessivi di circa il 20-30%.

2.6 Caso studio: la nuova linea metropolitana M11 Gaytterepe-Havalimani

La linea metropolitana *M11 Gaytterepe-Havalimani (Istanbul New Airport)* sarà una nuova linea metropolitana ad automazione integrale che collegherà il centro cittadino con il nuovo aeroporto di Istanbul, situato a nord-ovest della città e inaugurato il 29 ottobre 2018. Il nuovo aeroporto di Istanbul è nato per sostituire l'aeroporto Ataturk oramai giunto a saturazione per via della grande crescita della compagnia di bandiera Turca. Ad oggi il nuovo aeroporto può ospitare 3.000 voli al giorno e 90 milioni di passeggeri all'anno. Secondo i progetti, quando nel 2028 saranno costruite tutte e sei le piste di atterraggio (per ora quelle funzionanti sono due), dall'aeroporto potranno passare 200 milioni di passeggeri all'anno: diverrebbe il più trafficato del mondo, il doppio rispetto all'aeroporto che detiene attualmente il record, quello di Atlanta con 107 milioni di passeggeri [e].



Figura 14: Nuovo aeroporto di Istanbul

L'aeroporto sorge a circa 35 km dal centro ed avrà un ruolo strategico nel futuro della città e della Turchia, motivo per cui si è scelto di costruire una linea metropolitana automatica per collegarlo alla città.

La linea metropolitana è attualmente in costruzione e la sua apertura è prevista per il 2020. Questa è la prima fase (in arancio in figura 15) di un progetto più ampio che prevede un successivo collegamento fra l'aeroporto e la località di Halkali, situata a sud-ovest della città (in giallo).

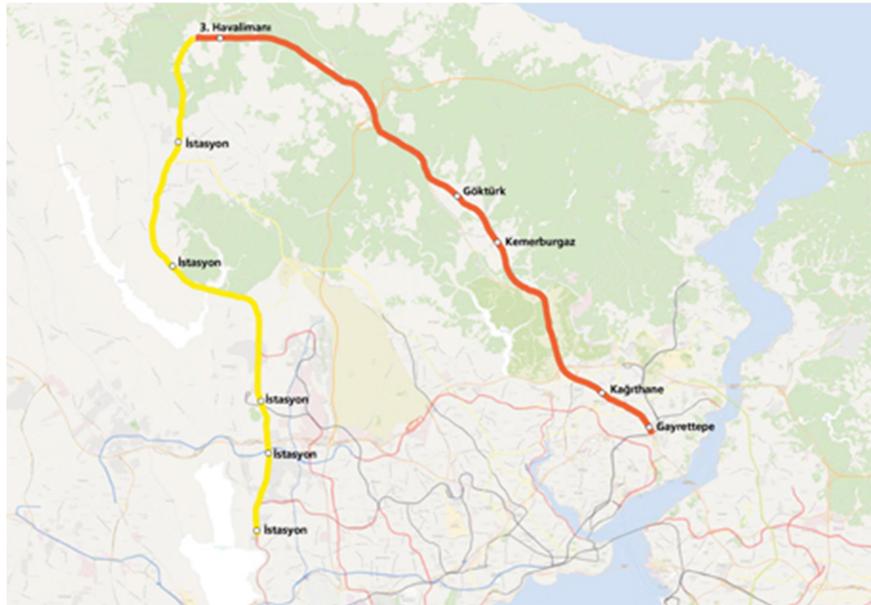


Figura 15: Tracciato della metropolitana M11 Gaytterepe – Havalimani (Nuovo aeroporto)

Le linee metropolitane automatiche sono l'ultima generazione di questo tipo di sistemi di trasporto e differiscono dalle metro classiche per la mancanza del conducente a bordo del treno, sostituito da sistemi di automazione che governano la programmazione del servizio ed il profilo di marcia del treno. Le prestazioni ed il consumo energetico dipenderanno fortemente dalla progettazione di questi aspetti e sarà il tema principale di questa tesi.

La metropolitana a guida automatica è sempre più adottata nelle nuove installazioni nel mondo ed in genere è associata a sistemi metropolitani leggeri, che differiscono dai sistemi tradizionali per l'uso di infrastrutture più snelle (costruite in gallerie di minore ingombro) e di convogli più piccoli e quindi con minore capienza. Queste caratteristiche portano a potenzialità minori delle metro classiche, fra i 10 ed i 30 mila passeggeri per senso di marcia contro i 30-50 mila dei sistemi tradizionali, però permettono intervalli di passaggio molto contenuti. Questo spesso è preferito soprattutto nei contesti di città medio-grandi ove le metro classiche porterebbero ad eccessive spese per la costruzione e la gestione dell'infrastruttura oltre a non essere giustificate da una sufficiente domanda.

Nel caso della nuova metro di Istanbul si è scelto di adottare sistemi di automazione di ultima generazione anche su un'infrastruttura e materiale rotabile propri dei sistemi classici e non di una metro leggera, come si può notare dalla velocità massima ammessa sulla linea, 120 km/h, e dalla capienza dei convogli, superiore alle 2000 persone.

Di seguito vengono elencate le principali caratteristiche della nuova linea metropolitana:

Lunghezza [km]	36
Numero stazioni	9
Velocità massima di linea [km/h]	120
Velocità massima in banchina [km/h]	50
Capacità massima teorica [pax/h/senso di marcia]	41440
Lunghezza banchina [m]	180
Headway operativa [s]	180

Tabella 6: Caratteristiche linea M11 Gaytterepe - Havalimani

L'infrastruttura si sviluppa completamente in sotterranea con circa 36 km di tunnel a doppia canna che collegano le 9 stazioni elencate di seguito (si adotta la classica notazione ferroviaria *km+metri* per indicare la progressiva chilometrica).

In direzione Havalimani:

Stazione	Nome	Progressiva fine banchina [km+m]
S01	Gaytterepe	0+000.00
S02	Kagithane	3+299.235
S03	Hasdal	8+752.024
S04	Kemberburgaz	14+363.912
S05	Gokturk	17+493.183
S06	Ihsaniye	27+450.851
S07	Havalimani 2	31+315.761
S08	Havalimani 1	33+487.034
S09	Havalimani 3	35+991.818

Tabella 7: Stazioni e relative quote progressive in direzione Havalimani

In direzione Gaytterepe:

Stazione	Nome	Progressiva fine banchina [km+m]
S09	Havalimani 3	0+000.00
S08	Havalimani 1	2+504.687
S07	Havalimani 2	4+675.848
S06	Ihsaniye	8+525.072
S05	Gokturk	18+484.779
S04	Kemberburgaz	21+606.213
S03	Hasdal	27+216.500
S02	Kagithane	32+692.819
S01	Gaytterepe	35+987.329

Tabella 8: Stazioni e relative quote progressive in direzione Gaytterepe

Viene indicata la progressiva di fine banchina poiché è il punto in cui il treno si ferma arrivando in stazione.

Le caratteristiche plano-altimetriche del tracciato sono state fornite da Geodata attraverso elaborati .dwg dai quali sono state estratte tutte le informazioni necessarie alla modellazione dell'infrastruttura. A titolo di esempio, di seguito si riporta in formato tabellare una porzione delle caratteristiche altimetriche (tabella 9) e planimetriche (tabella 10) del tracciato in direzione Gaytterepe-Havalimani.

Progressiva Iniziale [m]	Progressiva Finale [m]	Lunghezza [m]	i [%]	Rv [m]
0	247,148	247,148	0	-
247,148	419,898	172,75	-	7200
419,898	1573,728	1153,83	-2,4	-
1573,728	1965,549	391,821	-	-28000
1965,549	2181,648	216,099	-1	-
2181,648	2405,433	223,785	-	8000
2405,433	3033,095	627,662	-3,8	-

Tabella 9: Caratteristiche altimetriche del tracciato in direzione Gaytterepe-Havalimani

Progressiva Iniziale [m]	Progressiva Finale [m]	Lunghezza	R[m]	fattore di scala A
0	225,788	225,788	∞	-
225,788	300,788	75	-	300
300,788	421,507	120,719	1200	-
421,507	496,507	75	-	300
496,507	607,152	110,645	∞	-
607,152	682,152	75	-	300
682,152	802,871	120,719	1200	-

Tabella 10: Caratteristiche planimetriche del tracciato in direzione Gaytterepe-Havalimani

Le caratteristiche altimetriche del tracciato, per entrambe le direzioni di marcia, sono rappresentate in figura 16:

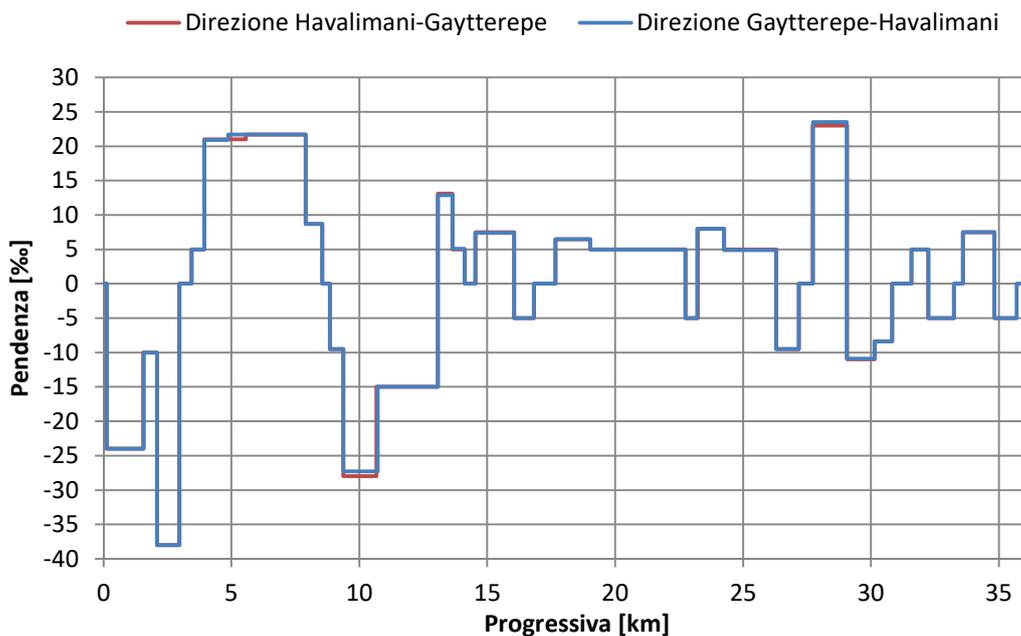


Figura 16: Diagramma pendenza longitudinale-progressiva

La guida del treno lungo l'infrastruttura è garantita da binari in acciaio con scartamento standard di 1435mm.

La linea è alimentata da un sistema a catenarie rigide che fornisce energia elettrica in corrente continua a 1500 V.

Per quanto riguarda l'esercizio, la linea adotta automazione integrale *GoA4 CBTC driverless con blocco mobile*, vale a dire che il treno è controllato automaticamente dalla centrale di controllo (nessun operatore a bordo) in ogni istante, inclusa l'apertura e chiusura porte, l'individuazione di ostacoli e le situazioni di emergenza.

L'adozione del blocco mobile permette inoltre un minor distanziamento temporale dei treni e quindi una maggior frequenza. Il valore minimo di headway fra treni successivi è imposto in 3 minuti; in situazioni di esercizio ordinario però si adottano valori più alti, intorno ai 5 minuti. Questa scelta deriva dalla non omogenea domanda durante la giornata tipo, motivo per cui non è necessario spingere il sistema al massimo delle potenzialità in ogni istante. Si varierà il distanziamento temporale, diminuendolo o aumentandolo, in modo dinamico così da poter rispondere a picchi/morbide di domanda in determinati momenti della giornata.

La velocità dei treni in approccio/partenza banchina è limitata a 50 km/h.

Il tempo di sosta in stazione varia fra 20 e 30 secondi.

L'esercizio è svolto da convogli formati da 8 veicoli, tutti motorizzati, per una lunghezza complessiva di 180 metri, pari alla lunghezza della banchina.

Le caratteristiche dei veicoli sono riportate in tabella 11.

Lunghezza convoglio da 8 veicoli [m]	180
Accelerazione massima in esercizio [m/s^2]	0,8
Accelerazione massima raggiungibile [m/s^2]	1,1
Decelerazione elettrica massima in esercizio [m/s^2]	1
Decelerazione meccanica massima in esercizio [m/s^2]	1,1
Decelerazione meccanica massima raggiungibile [m/s^2]	1,3
Sforzo massimo di trazione per 1 veicolo [kN]	67,5
Sforzo massimo di trazione del convoglio [kN]	540
Massa a vuoto [ton]	148
Massa in AW2 [ton]	200
Massa in AW3 [ton]	220,5
Coefficiente di rendimento motore elettrico	0,85
Coefficiente di rendimento motore elettrico come generatore	0,2
Masse rotanti [%]	10
Area frontale [m^2]	9,34

Tabella 11: Caratteristiche veicoli impiegati sulla linea

Sono note inoltre le curve di trazione e di frenatura in funzione della velocità, scalate per un solo veicolo:

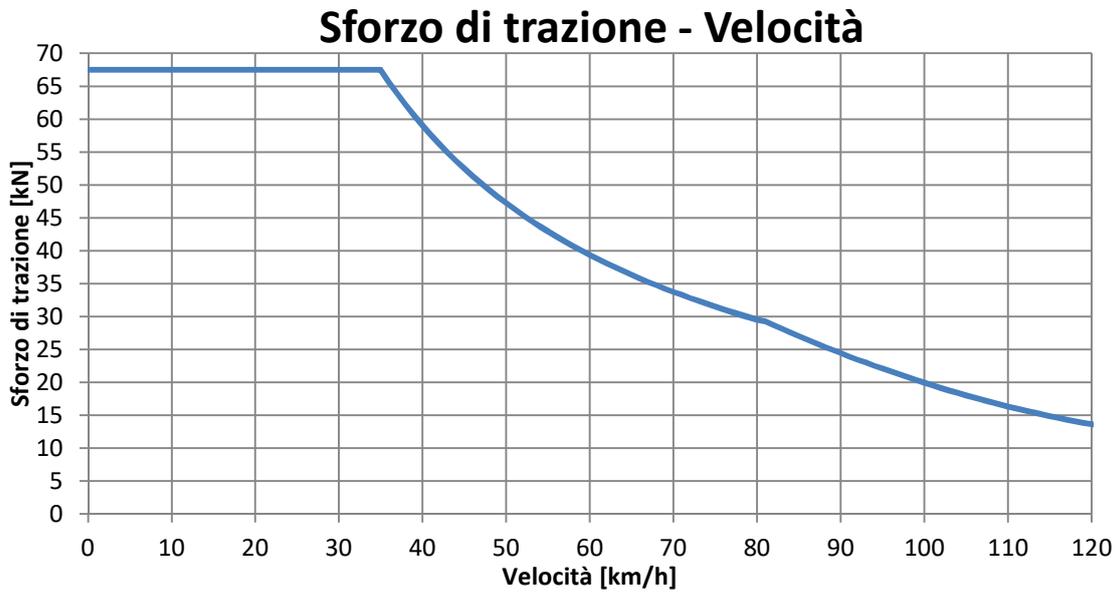


Figura 17: Sforzo di trazione in funzione della velocità per 1 veicolo

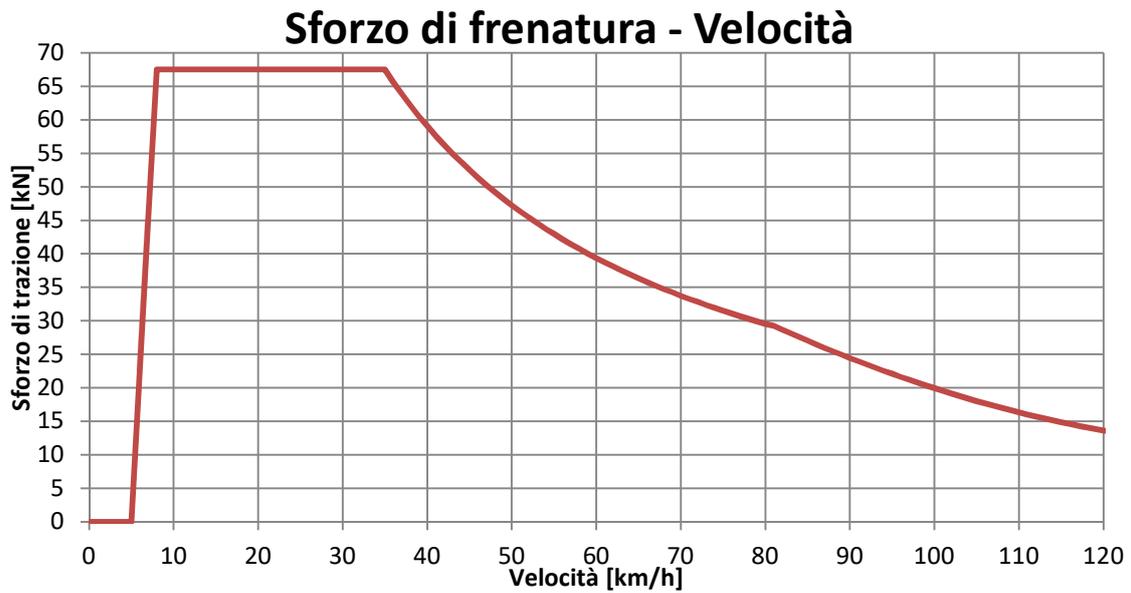


Figura 18: Sforzo di frenatura in funzione della velocità per 1 veicolo

Dai suddetti valori di trazione si è determinata la curva di accelerazione in funzione della velocità (figura 19).

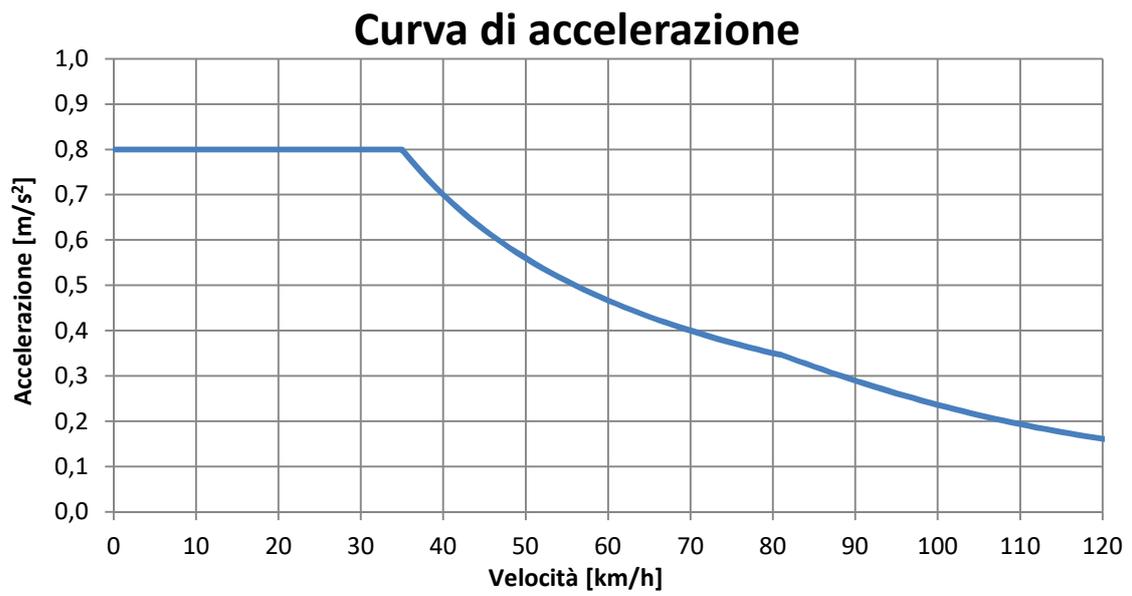


Figura 19: Curva di accelerazione in funzione della velocità per 1 veicolo

3. Ottimizzazione multi-obiettivo con algoritmo genetico

3.1. Introduzione alle ottimizzazioni multi-obiettivo

Nella risoluzione di problemi complessi capita spesso di dover perseguire diversi obiettivi nella ricerca della miglior soluzione e quando questi obiettivi risultano essere in contrasto (come ad esempio può accadere nel dimensionamento di una trave ove si cerca il minor impiego di materiali in contemporanea al contenimento delle deformazioni) l'individuazione della soluzione ottimale diviene non univoca. Questo significa che non c'è una soluzione migliore in assoluto ma vi sono diverse soluzioni, ognuna delle quali soddisfa in modo diverso gli obiettivi.

Per poter scegliere quale soluzione sia la migliore al nostro scopo occorre applicare metodi che valutino in contemporanea le funzioni obiettivo e che riescano a individuare nello spazio delle soluzioni il sottoinsieme più adatto e coerente alle nostre esigenze. Per fare ciò occorre ricorrere a *metodi di ottimizzazione Multi-obiettivo*, descritti matematicamente in questo modo:

$$\min_{x \in S} F(x) = \min_{x \in S} [f_1(x), f_2(x), \dots, f_n(x)]$$

Dove $n > 1$ e S è l'insieme dei vincoli.

Non si può però pensare di assimilare un processo di ottimizzazione alla semplice minimizzazione di un termine scalare perché ciò non risulta applicabile in un ambiente multi-obiettivo. Occorre introdurre un nuovo concetto: *l'ottimo di Pareto*. Una soluzione si definisce ottima di Pareto per un problema multi-obiettivo se tutte le altre soluzioni $x \in S$ presentano un valore maggiore per almeno una delle funzioni obiettivo. L'insieme di tutte le soluzioni ottime di Pareto definisce il *fronte di Pareto*. Senza ulteriori informazioni nessuna fra le soluzioni ottime di Pareto può essere definita migliore delle altre e inoltre tale set di soluzioni spesso non può essere calcolato in modo analitico tramite una formula matematica esplicita. Ci rivolgiamo dunque a strumenti della ricerca operativa e ricorriamo a metodologie di tipo euristico, in particolare agli Algoritmo Evolutivi.

Fra i diversi algoritmi evolutivi adatti a risolvere tali tipologie di problemi ci concentreremo sugli *Algoritmi Genetici*: introdotti da Holland nel 1975, gli algoritmi genetici sono algoritmi di ricerca basati sul meccanismo della selezione naturale che segue un importante principio: la sopravvivenza del più forte.

Un algoritmo genetico (GA) imita il processo biologico nella quale i genitori trasmettono gli attributi ereditari alla loro prole. Più gli attributi ereditari saranno positivi per la sopravvivenza, più l'individuo avrà probabilità di riprodursi e quindi di veder trasmettere tali attributi alle generazioni successive. In tal modo si emula il processo evolutivo allo scopo di individuare, al suo termine, una soluzione ottima al problema di ottimizzazione.

Le tecniche di ricerca tradizionali fanno uso di un singolo punto di ricerca nel dominio della funzione da ottimizzare, mentre un GA utilizza più punti di ricerca contemporaneamente e quindi ha più opportunità di individuare le soluzioni ottimali globali.

Ciascuno dei punti di ricerca corrisponde a una delle soluzioni ed è rappresentato da una stringa di elementi; ogni elemento è definito *gene* e l'insieme di un numero m di geni forma il *cromosoma*.

Il *gene*, come unità di base del cromosoma, contiene le informazioni che lo caratterizzano e rappresenta determinate caratteristiche.

Ogni individuo viene dunque descritto dal suo cromosoma, sulla base della quale viene successivamente determinato il corrispondente valore di *fitness* (espresso dalla combinazione dei valori delle n funzioni obiettivo).

Individui con valori di fitness più elevati hanno maggiori probabilità di sopravvivere e di essere selezionati per passare attraverso le procedure genetiche (crossover e mutazione) necessarie a generare la prole e a mantenere la diversità nella popolazione.

Attraverso l'iterazione di queste procedure si osserva che le soluzioni, corrispondenti ai punti di ricerca, migliorano gradualmente e possono raggiungere punti rappresentanti l'ottimo globale.

Le maggiori difficoltà presenti nella progettazione di un algoritmo genetico risiedono nella rappresentazione degli individui, nella definizione delle funzioni obiettivo, nella combinazione di tali funzioni e infine nella implementazione delle procedure genetiche. Questi sono i quattro passaggi determinanti per ottenere un algoritmo efficiente e che converga verso la soluzione.

In letteratura vi sono numerose ricerche scientifiche, in ambito trasporti, che utilizzano ottimizzazioni multi-obiettivo, sia con che senza l'adozione di un algoritmo genetico, allo

scopo di individuare la soluzione ottima. Molto studi riguardano proprio l'ottimizzazione di sistemi di trasporto metropolitani, spesso ad automazione integrale come nel nostro caso, poiché ben si adattano a subire programmazioni molto rigide.

Di seguito vengono descritti tali studi.

3.2. Rassegna bibliografica di studi analoghi

Negli ultimi anni, con l'aumento della potenza computazionale e la crescita dell'intelligenza artificiale, i GA si sono sviluppati molto velocemente, spesso proprio nel campo dell'ottimizzazione multi-obiettivo, con notevoli risultati.

In ambito trasporti sono state numerose le ricerche scientifiche che hanno affrontato il tema dell'impatto energetico, in particolare riguardanti tratte ferroviarie e metropolitane. Proprio le metropolitane sono oggetto di particolare attenzione e sono numerose le possibili strategie proposte per migliorare un sistema di trasporto che già rappresenta un punto di riferimento per la mobilità urbana nel mondo.

Molte fra le ricerche di seguito esposte provengono dal mondo accademico cinese come chiara conseguenza della presenza di grandi metropoli. Queste, sia per ragioni economiche che ambientali, puntano a migliorare il funzionamento dei propri sistemi di trasporto e in particolare a ottimizzare la gestione delle loro linee metropolitane.

Molte fra le ricerche in ambito trasporti si rifanno e prendono spunto da studi precedenti che risultano essere un riferimento per la progettazione di una ottimizzazione multi-obiettivo.

La pubblicazione del 2006 *Multi-objective optimization using genetic algorithm: A tutorial* [8] fornisce un'ottima panoramica sul mondo degli algoritmi genetici. A sua volta tale studio richiama precedenti pubblicazioni, come: A fast elitist nondominated sorting genetic algorithm for multi-objective optimization: NSGA-II [9] il quale introduce innovazioni nella categoria degli algoritmi genetici NSGA, vale a dire quella tipologia di algoritmi che classificano gli individui in base a quanto questi risultano essere "dominati" e vi assegna un relativo rank. Per spiegare meglio il concetto occorre entrare nel dettaglio: gli individui appartenenti al rank 1, ad esempio, sono quelli *non-dominati* e rappresentano il miglior sottoinsieme della popolazione; a questi si assegna un valore di fitness massimo, che equivale a dire che saranno gli individui con più probabilità di riprodursi. Un ulteriore innovazione introdotta da [9] riguarda l'utilizzo di un particolare tipo di elitismo che

permette all'algoritmo di non perdere, durante l'evoluzione, quegli individui che risultano essere di buona qualità. Infatti attraverso le procedure genetiche (crossover e mutazione) si rischierebbe di contaminare tali individui e di perdere alcune caratteristiche positive.

L'algoritmo sviluppato in questa tesi fa tesoro delle innovazioni introdotte da questo studio e nel successivo capitolo 4, nella quale verrà esposta la struttura dell'algoritmo, si potrà apprezzare nel dettaglio quali procedure fanno riferimento a tale studio.

Ovviamente questa non è stata l'unica pubblicazione a essere utile per sviluppare l'algoritmo proposto in questa tesi ma rappresenta un riferimento in materia, difatti alcune fra le ricerche, esposte nelle successive pagine, vi fanno riferimento.

3.2.1 Ottimizzazioni multi-obiettivo con algoritmo genetico

Lo studio di Liang, Y., Liu, H., Qian, C., Wang, G.: *A modified genetic algorithm for multi-objective optimization on running curve of automatic train operation system using penalty function method (Int. J. Res., 2019)[1]* ha adottato una ottimizzazione multi-obiettivo che valuta la velocità, la puntualità, l'accuratezza del parcheggio, il comfort e il consumo energetico di un treno in sistemi ATO attraverso un algoritmo genetico abbinato ad una *funzione di penalità* (adottata allo scopo di velocizzare la convergenza dei risultati). La funzione di fitness è ottenuta adottando il *metodo dei coefficienti pesati* nella quale si assegna a ogni funzione obiettivo un peso che rispecchi la relativa importanza; in questo modo la formulazione multi-obiettivo si riduce a una ottimizzazione con singolo obiettivo. La selezione è effettuata con un meccanismo *roulette-wheel*. Il crossover è del tipo *2-point crossover*. I ricercatori dichiarano di aver ottenuto buoni risultati anche se non è effettuato nessun confronto con il profilo di marcia reale della linea.

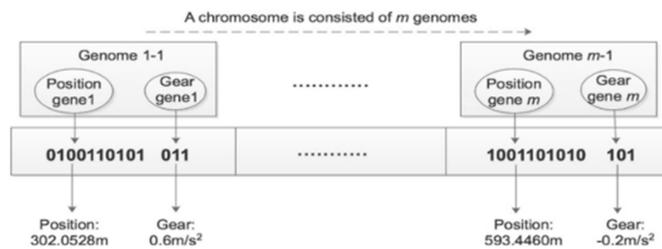


Figura 20: Codifica del cromosoma

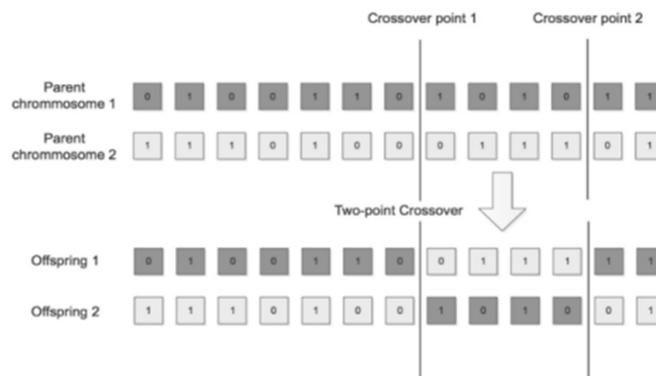


Figura 21: Crossover

Table 3 Parameter of interstation of Shanghai Metro Line 11	
Cao Yang Road—Long De Road	Value
Length of interstation	1000 m
Scheduled running time	90s
Length of station	120 m
Limit speed of station	60 km/h(16.67 m/s)
Limit speed of Line	80 km/h(22.22 m/s)

Figura 22: Parametri del tratto interstazione

Table 5 Comparison of optimum value of performance evaluation indices						
	Speeding	Punctuality (s)	Parking accuracy (m)	Energy consumption (kW · h)	Comfort	Fitness value
Experiment1	0	7.3261	-0.1739	18.8305	3.6	0.0260
Experiment2	0	-3.7066	-0.1541	19.0741	3	0.0327
Experiment3	0	-0.2493	-0.1302	16.9882	2.4	0.0501

Table 4 Genetic parameter settings of different experiments						
	Load state	Population size	Generations	Crossover probability	Mutation probability	Gap
Experiment 1	AW2	50	100	0.85	0.05	0.7
Experiment 2	AW2	100	200	0.85	0.05	0.7
Experiment 3	AW2	200	1000	0.85	0.05	0.7

Figura 23: Caratteristiche e risultati dei 3 esperimenti

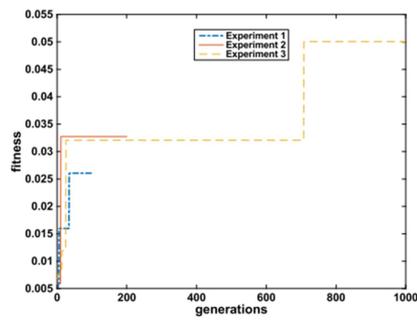


Fig. 9 Fitness evolution trend

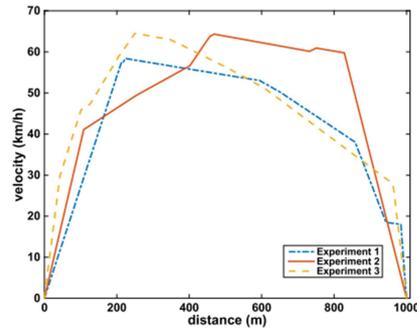


Fig. 10 Target distance-speed curve

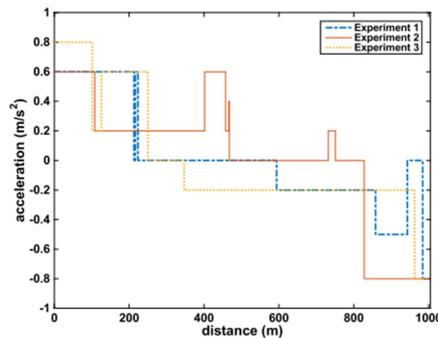


Fig. 11 Acceleration profile

Figura 24: Trend della funzione fitness, profilo di marcia e accelerazioni dei 3 esperimenti

Lo studio di Kampeerawar, W., Koseki, T., Zhou, F.: *Efficient urban railway design integrating train scheduling, onboard energy storage and traction power management (The 2018 International Power Electronics Conference)[2]* studia i vantaggi derivanti dall'equipaggiare i treni con dispositivi capaci di immagazzinare l'energia recuperata (Energy Storage System, ESS) nelle fasi di frenata. I ricercatori hanno adottato un approccio di progettazione integrata che considera la programmazione dei treni, la gestione delle fasi del moto e l'uso di dispositivi ESS. Hanno seguito 2 obiettivi: in primis minimizzare l'energia richiesta e la capacità degli ESS e poi minimizzare i surplus di energia recuperata e la capacità degli ESS. Viene fatta anche una comparazione fra progettazione integrata (programmazione dei treni e capacità degli ESS sono valutati insieme nella ricerca della soluzione) e non integrata (prima si ottimizza la programmazione dei treni e poi si determina la capacità degli ESS).

L'algoritmo che risolve il problema è di tipo genetico in cui i cromosomi definiscono gli orari delle corse, i tempi di attesa e la capacità degli ESS. Non viene specificata la tipologia di manipolazione genetica.

Il caso studio è una linea ferroviaria urbana in Thailandia (Bangkok Rapid Transit System). Fra i due metodi proposti, quello con progettazione integrata individui migliori soluzioni: i risultati evidenziano risparmi in termini di consumi fra il 15 ed il 25% circa con ESS della capacità di 7kWh.

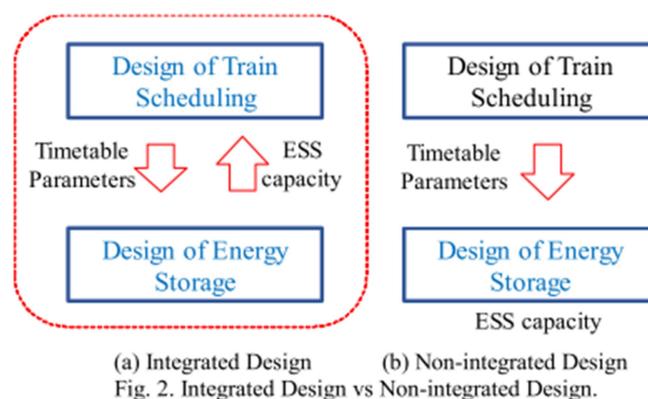


Figura 25: Progettazione integrata vs Progettazione non integrata

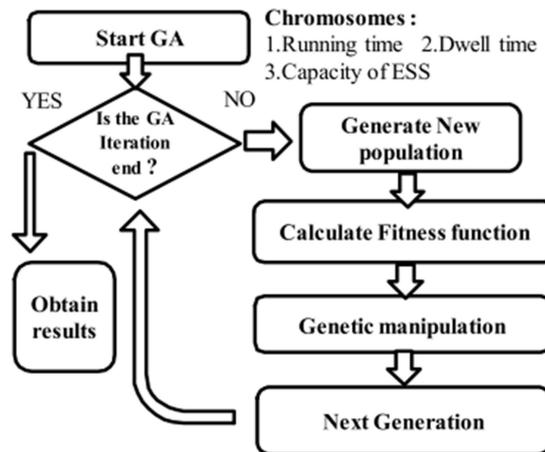


Figura 26: Diagramma di flusso del GA

Lo studio di Wang, H., Yang, X., Wu, J., Sun, H., Gao, Z.: *Metro timetable optimization for minimising carbon emission and passenger time: a bi-objective integer programming approach (EIT intel. Transp. Syst., 2018)[3]* ha proposto una ottimizzazione della programmazione di una metropolitana allo scopo di minimizzare le emissioni di carbonio ed il tempo di viaggio dei passeggeri con un approccio di programmazione integrata bi-obiettivo con algoritmo genetico. A differenza di precedenti studi, questo considera in maniera più approfondita la rigenerazione di energia in frenata differenziando la fase di frenata elettrica da quella di frenata meccanica, quest'ultima non produttiva di energia da recupero. Inoltre la ricerca valuta l'influenza del volume di passeggeri nel calcolo dei tempi di sosta e nel coordinamento delle tracce orarie.

La prima funzione obiettivo valuta l'emissione di carbonio correlandola al consumo energetico; la seconda funzione obiettivo valuta il tempo speso dai passeggeri (composto da tempo di attesa e tempo di viaggio) e lo adotta come indicatore di soddisfazione dei passeggeri.

Anche in questo caso la funzione di fitness è ottenuta adottando il *metodo dei coefficienti pesati* e la selezione è effettuata con un meccanismo *roulette-wheel*. Il crossover è del tipo *1-point crossover*.

Lo studio si concentra sulla massimizzazione del tempo di overlap fra un treno in partenza e uno in frenata elettrica e con questo approccio ottiene buoni risultati: lo scenario ottimizzato denota, nei confronti dello scenario attuale, un incremento dell'energia recuperata del 100.09%, la diminuzione delle emissioni di carbonio per il 4.03% e del tempo speso dai passeggeri per il 20.93%.

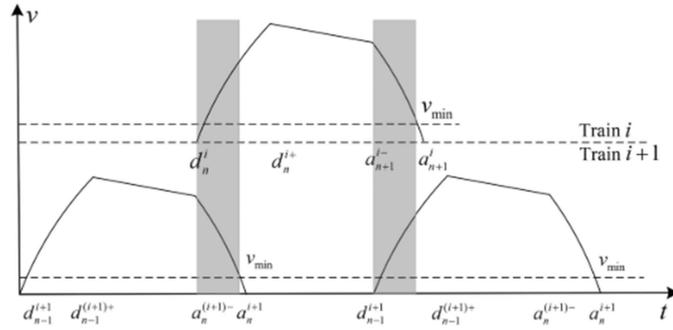


Figura 27: Overlap fra treno in trazione treno in frenata rigenerativa

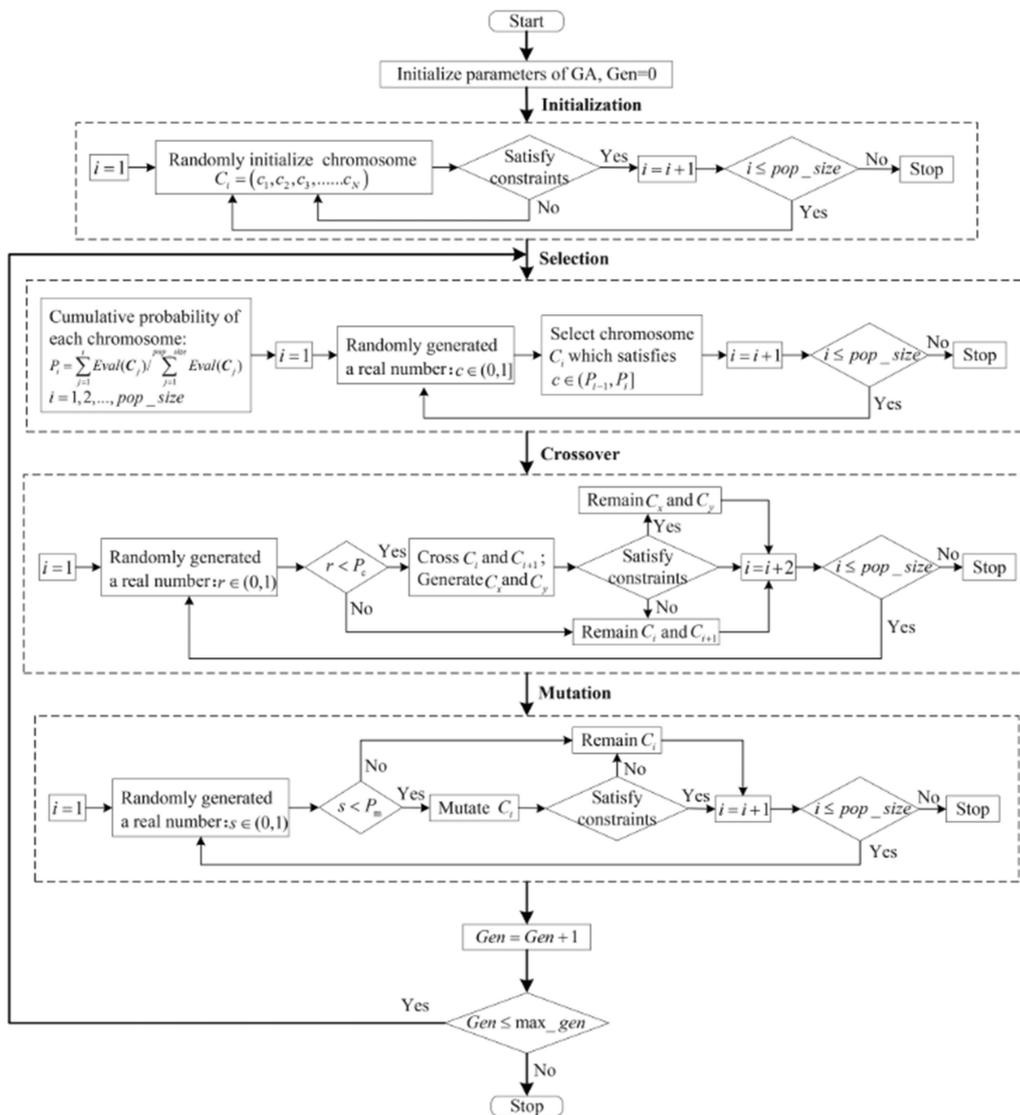


Figura 28: Flowchart del GA

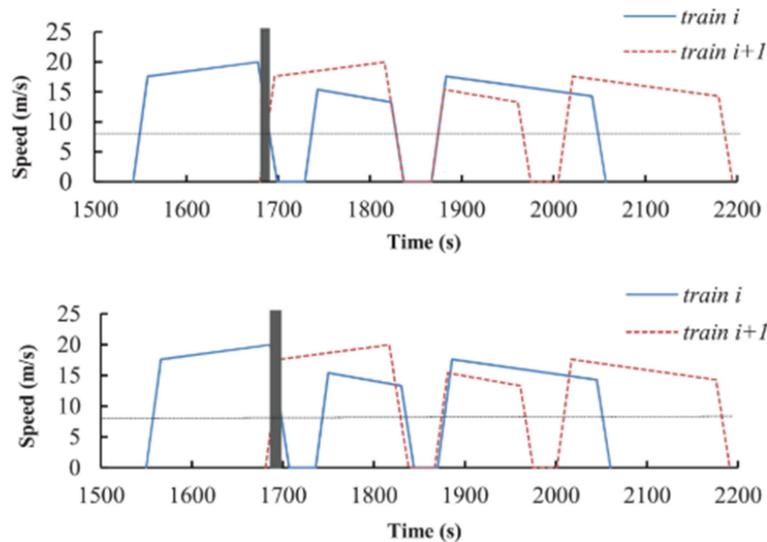


Figura 29 Confronto fra profilo di marcia corrente e ottimizzato

La ricerca di Zhou, Y., Bai, Y., Li, J., Mao, B., Li, T.: *Integrated optimization on train control and timetable to minimize net energy consumption of metro lines. (Journal of Advanced Transportation, 2018)[4]* propone un controllo dei treni e un orario grafico ottimizzato (attraverso l'uso di un *Non Sorting Genetic Simulated Annealing algorithm NS-GSA*) allo scopo di minimizzare il consumo energetico. Lo studio lavora sulle fasi di maximum acceleration, cruising, coasting e maximum braking; in particolare in funzione di livellette positive o negative si agisce sulla durata delle fasi in modo da non superare la velocità massima consentita e di minimizzare la fase di massima accelerazione.

L'algoritmo genetico adotta un *3-point crossover*. Per migliorare l'efficacia della ricerca viene adottata una *Neighborhood search* che confronta l'individuo i con gli individui presenti nelle vicinanze dello spazio delle soluzioni in cui i si trova e lo rimpiazza con un vicino se questo viene valutato come migliore. Per sfuggire dai casi di individuazione di un ottimo locale viene adottato un *algoritmo di Annealing* che sfavorisce sempre di più, nel corso delle generazioni, l'accettazione di individui valutati in modo negativo.

Il caso studio è la linea 5 della metro di Pechino (con 23 stazioni, lunga 27.6 km). I risultati evidenziano una riduzione del consumo energetico netto del 5% circa.

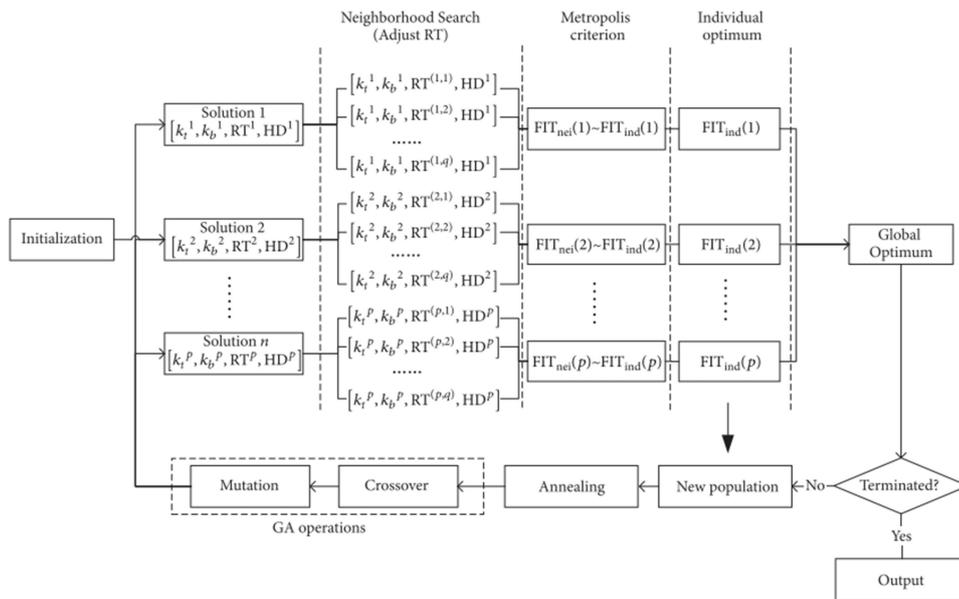


Figura 30 Flowchart del NS-GSA

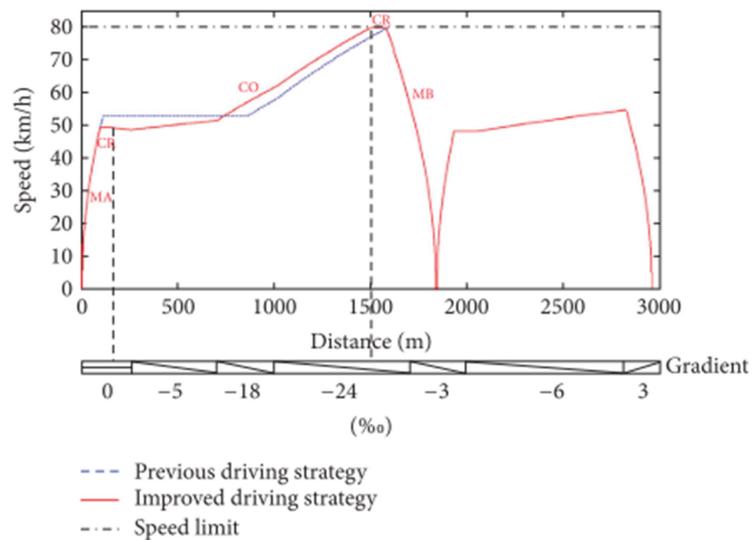


Figura 31 Comparazione fra strategia di guida attuale e ottimizzata

3.2.2 Ottimizzazioni multi-obiettivo senza algoritmo genetico

Lo studio [5] analizza l'efficacia di uno "stop-skipping patterns" nella quale, noti i dati di mobilità attraverso l'uso di smart card, si eliminano alcune fermate lungo il percorso, in particolare le stazioni in cui si registrano i minor numeri di salite/discese passeggeri. Questo approccio persegue lo scopo del risparmio energetico e del tempo di viaggio mentre va a considerare meno importanti gli utenti delle stazioni saltate. I risultati mostrano una riduzione dei consumi energetici del 15% e del tempo totale di viaggio dei treni del 7%.

In [6] i ricercatori hanno studiato i vantaggi derivanti dall'equipaggiare i treni con dispositivi capaci di immagazzinare l'energia recuperata (On Board Energy Storage Device, OBESD) nelle fasi di frenata. Questo permette di non dover restituire l'energia recuperata al sistema (e perderla nelle occasioni in cui non c'è un treno in partenza a richiederla) bensì rimane a disposizione del treno nelle successive fasi di trazione. Il caso studio è la linea metropolitana Yizhuang di Pechino. I risultati evidenziano un consumo energetico totale leggermente maggiore nel caso di treni equipaggiati con OBESD per via della maggior massa dei treni. Quasi il 13% del consumo energetico, però, è fornito dagli OBESD e dunque l'impatto totale della linea metropolitana è diminuito.

In [7] è stato analizzato il consumo energetico ed il tempo di viaggio di un sistema metropolitano nel caso di adozione del "express-local mode" (Vuchic, 2005) nella quale non tutti i treni fermano ad ogni stazione; è stato adottato un modello bi-obiettivo le cui variabili sono la programmazione dei treni Local e di quelli Express. Questo metodo richiede un'infrastruttura che permetta il sorpasso nelle stazioni (treno Express deve poter sorpassare il treno Local).

4. Algoritmo genetico proposto

L'algoritmo genetico sviluppato in questa tesi ha lo scopo di ottimizzare l'esercizio di un servizio metropolitano. Ciò viene fatto attraverso la generazione di un numero n di profili di marcia *pseudo-casuali* e una successiva evoluzione degli stessi, attuata tramite procedure che valutano, classificano e combinano i profili di marcia.

Nello specifico verranno studiate singolarmente tutte le tratte interstazione, per entrambe le direzioni di marcia, e verranno in seguito assemblate per formare l'orario grafico del treno lungo l'intera infrastruttura.

L'algoritmo è stato sviluppato con il linguaggio di programmazione Python 3 sul software Pyzo. Tutte le esecuzioni dell'algoritmo sono state eseguite su sistema operativo Windows 10 con processore Intel i7 CPU 2.50GHz e 8GB di RAM.

Si riporta di seguito una rappresentazione dell'algoritmo genetico tramite un diagramma di flusso.

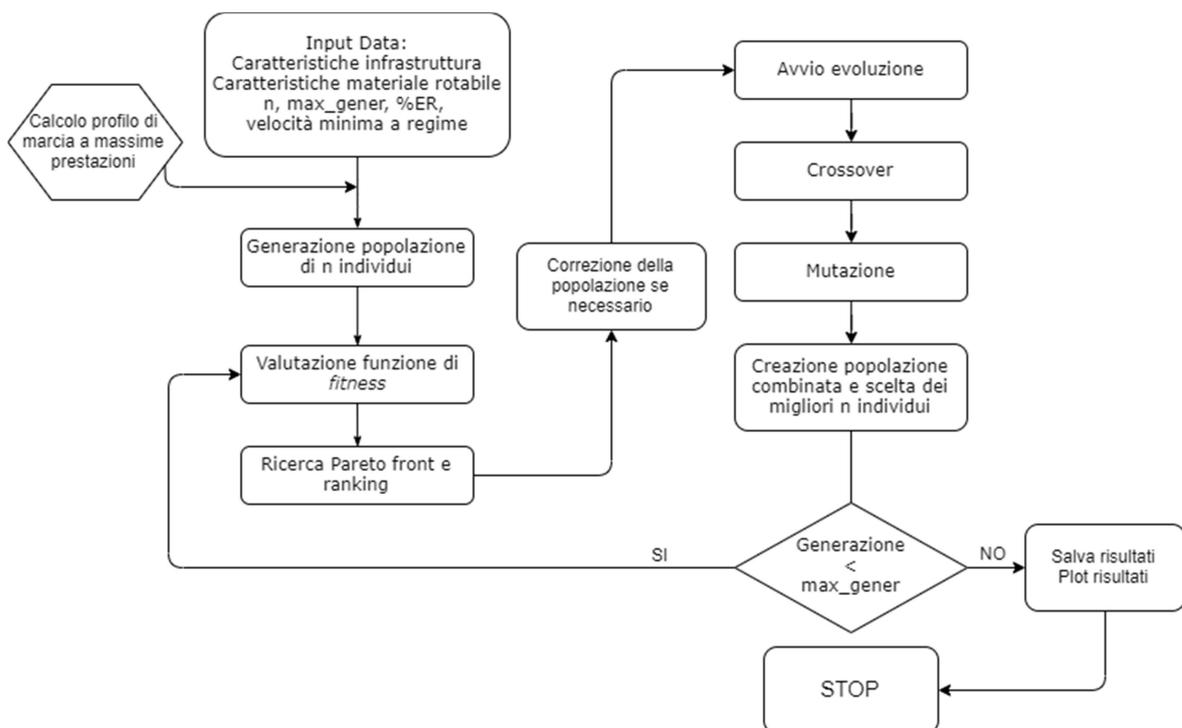


Figura 32 Diagramma di flusso dell'algoritmo genetico

Le operazioni rappresentate dal diagramma di flusso sono implementate nel codice attraverso l'algoritmo 0 di seguito esposto.

Algoritmo 0 I processi dell'algoritmo genetico

```

1 Per ogni tratta interstazione in entrambi i sensi di marcia:
2   Input: lunghezza L del tratto interstazione
3   Se generazione=0:
4     Avvio generazione di n cromosomi tramite l'algoritmo 1 generazione;
5   Ciclo while:
6     Avvio valutazione delle funzioni di fitness tramite l'algoritmo 2 valutazione;
7     Avvio del Parto ranking tramite l'algoritmo 3 pareto;
8     Avvio correzione della popolazione tramite l'algoritmo 7 correzione;
9     Avvio crossover tramite l'algoritmo 5 o 6;
10    Avvio mutazione tramite l'algoritmo 7 mutazione;
11    Applico correzione alla popolazione tramite l'algoritmo 7 correzione;
12    Avvio valutazione e pareto ranking con gli algoritmi 2 e 3 ;
13    Applico elitismo tramite l'algoritmo 8 elitismo;
14    Se gener < max_gener → torna al punto 6
15  Ritorna cromosomi, x, a, v, t, R, T, fv, fa, fe, fer, ft, fvn, fan, fEn, ftn

```

Di seguito verranno espone nel dettaglio tutte le componenti che costituiscono l'algoritmo genetico sviluppato.

4.1 Dati di input

Quando viene avviato l'algoritmo, questo importa e legge immediatamente una quantità di dati forniti come input iniziale. Questi sono dati fissi e comprendono le caratteristiche plano-altimetriche dell'infrastruttura, la massa e le caratteristiche di trazione dei treni, i limiti di velocità in linea e in banchina e altri dati utili ai calcoli, riportati di seguito.

Resistenza specifica al rotolamento r_{rot} [N/N]	0,035
Parametro a (R_{curva})	0,650
Parametro b (R_{curva})	55
Coefficiente di forma (R_{aer})	0,45
Superficie di testata (R_{aer}) [m^2]	9,34
Densità dell'aria (R_{aer}) [$Nm^{-4}s^2$]	1,25

Tabella 12: Dati di input dell'algoritmo

Vi sono alcuni dati che non sono fissi e la cui scelta risulta determinante per i risultati da raggiungere: il numero di individui da generare, il numero di evoluzioni cui assoggettare la popolazione e la velocità minima ammessa nella fase a regime.

Il primo fattore, la grandezza della popolazione, altro non è che lo spazio delle soluzioni generate inizialmente in modo pseudo-casuale. Accrescere la popolazione implicherebbe più probabilità di individuare una soluzione ottima globale ma comporterebbe un costo computazionale sempre maggiore. Il secondo fattore, il numero di evoluzioni, è determinante per la qualità della soluzione finale e andrebbe determinato in funzione del comportamento che la popolazione stessa assume durante l'evoluzione. Occorre individuare il numero di evoluzioni necessarie per far convergere la popolazione verso la soluzione cercata, evitando di imporre evoluzioni ulteriori e non necessarie, così da non incorrere in sforzi computazionali superflui. Allo stesso modo si deve cercare di evitare un numero troppo basso di evoluzioni che non porterebbero a convergenza. Il terzo fattore, la velocità minima ammessa nella fase a regime, rappresenta il limite inferiore verso cui l'evoluzione tenderà a far convergere le velocità degli individui e vedremo in seguito essere molto influente.

In questo studio sono state effettuate numerose simulazioni, con popolazione da 50 a 500 individui e numero di evoluzioni da 50 a 1000 e si è notato che sono sufficienti 100 individui e 100 generazioni per ottenere i risultati attesi.

4.2 La generazione

Dapprima occorre definire il modo in cui ogni profilo di marcia, chiamato *individuo* nell'ambito di un algoritmo genetico, viene definito e rappresentato. L'individuo può essere rappresentato in due modi, attraverso una codifica binaria (binary coded) o attraverso una codifica reale (real coded).

La prima metodologia converte le caratteristiche dell'individuo in rappresentazione binaria e si presta bene per problemi in cui non vi sono forti condizioni al contorno che limitano la variabilità delle caratteristiche dell'individuo stesso. La scelta della codifica binaria (rappresentata da una sequenza di 0 e 1) ha conseguenze soprattutto nella definizione dei successivi operatori che agiranno sul cromosoma: *crossover* e *mutazione*. Questi operatori hanno lo scopo di generare una *prole* partendo dai *genitori*, nello specifico il crossover unisce le caratteristiche di due individui, i genitori, per creare un figlio; la mutazione

apporta delle modifiche (con una certa probabilità definita a priori) alle caratteristiche di ogni individuo appartenente alla nuova generazione, la prole. Quando questi operatori agiscono su individui con codifica binaria, apportano delle modifiche a porzioni di geni, a geni interi o anche a più geni e lo fanno attuando uno scambio: ad esempio un bit di un gene viene trasformato da valore 0 a valore 1, o viceversa. Così facendo non vi è alcun controllo sulle caratteristiche che l'individuo assumerà a modifica avvenuta, motivo per cui questo approccio è, come detto, adatto a problemi di bassa complessità, che non vedono al loro interno vincoli forti da rispettare.

La codifica reale invece si adatta bene a tutti quei problemi più complessi nella quale le caratteristiche dell'individuo possono essere molto varie, ma comunque limitate da condizioni al contorno difficilmente implementabili tramite una rappresentazione binaria. Proprio per questo motivo nel nostro caso è stata adottata una codifica reale nella quale le caratteristiche sono espresse con il consueto sistema metrico decimale.

Che si adotti un metodo di codifica o un altro, l'individuo sarà sempre formato da un numero m di geni; da qui deriva la notazione *cromosoma* per gli individui di un algoritmo genetico. Il gene è l'unità costitutiva del cromosoma e ognuno di essi contiene le informazioni caratterizzanti l'individuo.

In questo lavoro ogni gene è riferito a una posizione nello spazio e contiene 6 tipi di informazione: la posizione x (coordinata progressiva in metri), l'accelerazione istantanea a (espressa in m/s^2), la velocità v (espressa in m/s e in km/h), il tempo di percorrenza t (espresso in s), le resistenze al moto R e lo sforzo di trazione T (entrambi espressi in N o kN).

Risulta utile generare anche un individuo che descrive il percorso di un treno che viaggia a massime prestazioni. Di questo risulteranno utili in seguito il tempo di percorrenza e il consumo energetico.

In figura si riporta la rappresentazione del cromosoma.

Gene 0	Gene 1	...	Gene $m-1$
x_0	x_1		x_{m-1}
a_0	a_1		a_{m-1}
v_0	v_1		v_{m-1}
t_0	t_1		t_{m-1}
R_0	R_1		R_{m-1}
T_0	T_1		T_{m-1}

Figura 33: Rappresentazione del cromosoma

Ogni gene del cromosoma è riferito a una fase del moto: geni da 0 a 10 accelerazione, gene 10-11 regime, gene 11-12 coasting, geni 12-15 frenata elettrica, geni 15-18 frenata meccanica, gene 18 arresto.

La generazione degli individui è definita pseudo-casuale poiché per determinare le posizioni x_i che definiscono i geni si ci affida al modulo Random di Python.

La prima accelerazione x_0 è imposta al valore $0,5 \text{ m/s}^2$ così da non superare la velocità limite in banchina. Le successive accelerazioni sono determinate rispettando la curva delle accelerazioni. In funzione della posizione e dell'accelerazione imposta, vengono calcolate le velocità, i tempi di percorrenza, le resistenze al moto e gli sforzi di trazione per ognuno dei geni.

A valle della generazione di un individuo sono posti dei vincoli alla sua accettabilità:

- Il punto di arresto deve essere a ± 10 metri dal punto prefissato;
- Il tempo di percorrenza non può essere oltre il 30% in più rispetto al tempo di percorrenza di un treno che viaggia a massime prestazioni;
- La velocità massima raggiunta dal treno non può essere minore di 90 o 100 km/h in funzione dello scenario esplorato;
- La velocità massima raggiunta dal treno non può essere maggiore di 120 km/h;

Se tali vincoli sono rispettati, l'individuo viene accettato e si procede alla generazione dell'individuo successivo. Se uno dei vincoli viene violato l'individuo viene rigettato e la generazione dell'individuo i -esimo è riavviata.

Le operazioni appena descritte sono riassunte nell'algoritmo 1.

Algoritmo 1 Generazione

- 1 Input: lunghezza L del tratto interstazione
 - 2 Definisco il cromosoma composto da m geni
 - 3 Genero casualmente le x comprese fra 0 e L che definiscono le fasi del moto
 - 4 Genero le accelerazioni a coerenti con la curva di accelerazione
 - 5 Per ogni gene calcolo la velocità v , il tempo di percorrenza t , la resistenza al moto R e lo sforzo di trazione richiesto T
 - 6 Se condizioni di accettazione sono rispettate: ritorna il cromosoma
 - 7 Se condizioni di accettazione non sono rispettate: ritorna al punto 3
-

4.3 Le funzioni di valutazione

Il secondo passo nella creazione di un algoritmo genetico, spesso rappresentante quello più importante e impattante nella qualità dei risultati, consiste nella definizione delle *funzioni di valutazione o di fitness*. Queste funzioni rappresentano l'indice di valutazione delle performance dell'individuo e comprendono: la funzione di valutazione della velocità f_v , la funzione consumo energetico f_e , la funzione comfort f_a e la funzione tempo di percorrenza f_t . Per la definizione di tali funzioni si è preso spunto dallo studio [1], già citato nel paragrafo 3.2.1, nella quale vengono proposte le sopracitate funzioni. Due di queste sono state prese tal quali, la f_a e la f_t , mentre le altre sono state opportunamente modificate per adattarle agli scopi di questo lavoro.

Di seguito le funzioni vengono esposte nel dettaglio.

4.3.1 Funzione di valutazione della velocità

La funzione di valutazione della velocità è un indice che esprime la qualità dell'individuo in termini di sicurezza e di prestazioni. La funzione, descritta dalle equazioni (2), assume valore 0 quando il treno non supera mai la velocità limite e assume la velocità massima lungo la fase a regime. La crescita della funzione può indicare la non sicurezza del treno, se vi è stato un superamento della velocità limite, oppure può indicare un treno che non ha assunto la velocità massima a regime e ciò implica un sacrificio in termini di tempo di percorrenza.

$$f_v = \begin{cases} 0 & \text{se } V_i < V_{limite} \text{ e } V_{reg} = V_{lim} \\ \sum (V_i - V_{lim}) & \text{se } V_i > V_{lim} \\ \sum (V_{lim} - V_{reg}) & \text{se } V_{reg} < V_{lim} \end{cases} \quad (2)$$

Dove V_i è la velocità del treno al gene i -esimo, V_{lim} è la velocità limite ammessa in linea e in banchina, V_{reg} è la velocità assunta dal treno a regime.

4.3.2 Funzione consumo energetico

La funzione consumo energetico comprende due funzioni: la funzione che valuta l'energia spesa per la trazione del treno f_e e la funzione che valuta l'energia recuperata in fase di frenata elettrica rigenerativa f_{er} . Entrambe sono calcolate nello stesso modo, la prima però interviene solo quando c'è un'accelerazione positiva, mentre la seconda interviene solo quando vi è una frenata elettrica. L'energia è valutata in kWh e viene calcolata come descritto dall'equazione (3).

$$f_e = \begin{cases} 0 & \text{se } T_i \leq 0 \\ \sum \left(\frac{T_i * v_{media(i,i-1)}}{\eta} + P_{aux} \right) * (t_i - t_{i-1}) & \text{se } T_i > 0 \end{cases}$$

$$f_{er} = \begin{cases} 0 & \text{se } T_i \geq 0 \\ \sum \eta_r * (T_i * v_{media(i,i-1)} + P_{aux}) * (t_i - t_{i-1}) & \text{se } T_i < 0 \end{cases}$$
(3)

Dove T_i rappresenta lo sforzo di trazione del gene i -esimo espresso in kN, v_{media} è la velocità media fra il gene i e il gene $i+1$ espressa in m/s, η è il coefficiente di rendimento del motore elettrico (utile per la conversione energia elettrica→energia meccanica), η_r è il coefficiente di rendimento del motore elettrico in fase di rigenerazione di energia (conversione energia meccanica→energia elettrica), P_{aux} è la potenza necessaria al funzionamento dei sistemi di bordo dei treni (climatizzazione, luci, impianto freni, ecc) espressa in kW e infine $(t_i - t_{i-1})$ è il tempo di percorrenza fra il gene i e il gene $i-1$.

Successivamente viene calcolata una terza funzione, chiamata f_E , che sottrae al consumo energetico la quantità di energia recuperata in frenata.

$$f_{E,j} = f_{e,j} - f_{er,j}$$
(4)

Dove il pedice j indica l'individuo j -esimo e il fattore ER indica la percentuale di energia recuperata che è possibile utilizzare, valutata nel 20%.

4.3.3 Funzione comfort

Questa funzione è utilizzata per misurare il comfort nel modo più coerente con la percezione umana, ovvero valutando la differenza di accelerazione cui i passeggeri sono soggetti. Maggiore sarà il valore della funzione, minore sarà il comfort percepito a bordo del treno.

$$f_a = \sum_{i=1}^l |a_i - a_{i-1}| \quad (5)$$

Dove a_i e a_{i-1} sono le accelerazioni riferite al gene i e al gene $i-1$.

4.3.4 Funzione tempo di percorrenza

La funzione tempo di percorrenza è un indicatore della puntualità e valuta la differenza del tempo totale di viaggio fra l'individuo j -esimo e l'individuo a massime prestazioni. La funzione assume valore positivo sia che il treno arrivi in anticipo rispetto a quello a massime prestazioni (in questo caso vi sarà una violazione della velocità massima lungo la linea) sia che arrivi in ritardo.

$$f_{t,j} = \sum |t_j - t_{MP}| \quad (5)$$

Le operazioni svolte per effettuare la valutazione sono riassunte nell'algoritmo 2.

Algoritmo 2 Valutazione

- 1 Input: n cromosomi, lunghezza L del tratto interstazione, tempo di percorrenza a mp
 - 2 Effettuo valutazione per ognuna delle funzioni;
 - 3 Per ognuna delle funzioni se ne genera una versione normalizzata;
 - 4 Ritorna $f_v, f_a, f_e, f_{er}, f_t, f_{vn}, f_{an}, f_{En}, f_{tn}$
-

4.4 Pareto ranking

Una volta calcolate le funzioni di valutazione, occorre capire come poter usare tali valori. Come già detto in fase di introduzione agli algoritmi genetici, ogni individuo avrà maggior probabilità di riproduzione quanto maggiore sarà la sua qualità, valutata proprio dalle suddette funzioni. Per definire tale probabilità però serve classificare in modo univoco gli individui e ciò viene fatto combinando i valori delle funzioni di valutazione.

Le possibili modalità di combinazione sono molteplici ma sono raggruppabili in 2 approcci principali: l'approccio con somma pesata e l'approccio con Pareto ranking. L'approccio con somma pesata è il più classico e vede la creazione di una funzione composta come somma pesata delle funzioni di valutazione normalizzate. In questo caso i risultati non sono sempre affidabili perché occorre calibrare il contributo di ogni funzione attraverso i relativi pesi e la complessità risiede proprio nella scelta dei pesi di ogni funzione. Può accadere che piccole modifiche ai pesi portino grandi variazioni ai risultati. L'approccio con Pareto ranking cerca di determinare un intero set di soluzioni ottime di Pareto, o un suo sottoinsieme rappresentativo. Un set di Pareto è un insieme di soluzioni che non sono dominanti fra loro: muovendosi da una soluzione di Pareto a un'altra ci sarà sempre un certo sacrificio in uno o più obiettivi per poter avere un certo vantaggio negli altri.

In questo studio si è scelto l'approccio con Pareto ranking e si è fatto riferimento alla pubblicazione [9] che propone un *nonsorting genetic algorithm* in cui gli individui sono classificati in base a quanto risultano essere dominati da altri individui. Per applicare questa idea a una ottimizzazione con 4 funzioni obiettivo, si è pensato di definire un *rank* e di incrementarlo ogni qual volta un individuo, per ognuno delle funzioni di valutazione, è superato da un altro. Questo metodo permette di individuare gli individui che generalmente sono meno dominati e soprattutto evita di valutare in modo positivo quegli individui che presentano buoni valori nella maggior parte delle funzioni e valori pessimi in una sola, classica situazione che l'approccio con somma pesata non riesce a gestire per via della perdita di informazioni dovuta alla somma pesata.

L'algoritmo 3 descrive le operazioni svolte per effettuare il rank con Pareto.

Algoritmo 3 Pareto ranking

```
1 Input: n cromosomi, funzioni  $f_{vN}, f_{aN}, f_{EN}, f_{tN}$ 
2 Per ogni cromosoma i fra 0 e n-1:
3   Per ogni cromosoma j fra 0 e n-1:
4     se  $j \neq i$ :
5       se  $f_{vN,i} \leq f_{vN,j} \rightarrow Rank_i = Rank_i + 1$ 
6       se  $f_{aN,i} \leq f_{aN,j} \rightarrow Rank_i = Rank_i + 1$ 
7       se  $f_{EN,i} \leq f_{EN,j} \rightarrow Rank_i = Rank_i + 1$ 
8       se  $f_{tN,i} \leq f_{tN,j} \rightarrow Rank_i = Rank_i + 1$ 
9 Dispongo in ordine crescente gli individui osservando il rank
10 Definisco il peso di ogni individuo in funzione del rank
11 Ritorno individui classificati, rank, pesi
```

4.5 Crossover

Il crossover è l'operatore che permette di generare un nuovo individuo, facente parte della nuova generazione detta *prole*, a partire da due individui della generazione precedente.

La prima fase del crossover consiste nella scelta dei due individui cui applicare l'operatore, scelta che dovrà tenere in considerazione la classificazione prodotta dal precedente operatore Pareto ranking. Questo fornisce per ogni individuo un valore definito *peso*, che determinerà la probabilità dello stesso di essere selezionato. La selezione è attuata tramite il modulo Random di python, in particolare viene utilizzato il comando *random.choices* cui si fornisce la lista degli individui, i corrispettivi pesi e il numero di elementi da estrarre dalla lista, nel nostro caso due. Una volta ricevuti gli individui, occorre decidere la tipologia di crossover da applicare: in questo studio si è scelto di applicare due tipologie di crossover allo scopo di incentivare quanto più possibile la varietà nella popolazione. La prima tipologia è detta *crossover valore medio* e genera un nuovo individuo attuando una media dei valori di posizione x e di accelerazione a dei genitori. Si è notato, nel corso delle simulazioni, che questo tipo di crossover provocava un "appiattimento" dei risultati verso velocità di percorrenza a regime lontane dalla velocità massima, così si è accoppiato a un'altra tipologia di operatore definito *crossover a 1 punto*. Questo metodo sceglie in maniera pseudo-casuale, sempre tramite il modulo random di python, un gene del cromosoma e attua uno scambio delle caratteristiche degli individui, dal gene estratto in poi. Entrambe le tipologie di crossover hanno probabilità 50% di essere selezionate per ogni riproduzione attuata dall'algoritmo.

Si riportano gli algoritmi 4 e 5 che descrivono le operazioni svolte dai due operatori di crossover.

Algoritmo 4 Crossover valore medio

- 1 Input: n individui classificati in base al rank, pesi
 - 2 Selezione 2 individui con la funzione random.choices a cui fornisco gli individui e i rispettivi pesi (scelta sarà random pesata);
 - 3 Genero nuovo individuo i cui geni avranno valori calcolati come media fra i valori dei genitori;
 - 4 Sulla base dei valori di x e a si calcolano i valori v, t, R e T dell'individuo appena creato
 - 5 Ritorna nuovo individuo
-

Algoritmo 5 Crossover a 1 punto

- 1 Input: n individui classificati in base al rank, pesi
 - 2 Selezione 2 individui con la funzione random.choices a cui fornisco gli individui e i rispettivi pesi (scelta sarà random pesata);
 - 3 Se gli individui sono incompatibili fra di loro → ritorna al punto 2
 - 4 Seleziona casualmente un gene C compreso fra le posizioni 2 e m-2
 - 5 Genera figlio così composto: $\begin{cases} \text{da gene } 0 \text{ a gene } C - 1 : \text{geni del genitore 1} \\ \text{da gene } C \text{ a gene } m - 1 : \text{geni del genitore 2} \end{cases}$
 - 6 Sulla base dei valori di x e a si calcolano i valori v, t, R e T dell'individuo appena creato
 - 7 Ritorna nuovo individuo
-

4.6 Mutazione

L'operatore mutazione permette l'introduzione di nuove caratteristiche nella popolazione attraverso una modifica casuale dei geni di alcuni individui. La funzione principale della mutazione è di contribuire a mantenere la diversità genetica della popolazione.

Mantenere la diversità genetica aiuta a uscire da situazioni potenzialmente indesiderate di minimo locale e aiuta a mantenere le caratteristiche genetiche degli individui ben assortite, migliorando di conseguenza la capacità di ricerca della soluzione ottima. Per questo operatore occorre definire una probabilità di mutazione, decisa nel 5%, che descrive la probabilità di ogni gene di ogni individuo di essere soggetta a mutazione.

La mutazione è attuata ai soli valori x_j e a_j : verrà generata una nuova posizione compresa fra i valori x_{j-1} e x_{j+1} e verrà generata un nuovo valore di accelerazione, sempre coerente con la massima accelerazione disponibile fornita dalla curva di accelerazione.

L'algoritmo 6 descrive le operazioni svolte per effettuare la mutazione.

Algoritmo 6 Mutazione

- 1 Input: n cromosomi
 - 2 Per ogni cromosoma i fra 0 e n-1:
 - 3 Per ogni gene j fra 2 e m-2:
 - 4 se *numero casuale fra 0 e 1* $< P_M \rightarrow$ applica mutazione al gene j
 - 5 Sulla base dei valori di x e a si calcolano i valori v, t, R e T dell'individuo appena creato;
 - 6 Ritorna nuovo individuo
-

4.7 Correzione

L'operatore correzione è utilizzato allo scopo di "centrare" la fermata di ogni individuo al bersaglio prestabilito, ovvero la distanza L di ogni tratta interstazione. Poiché in fase di generazione sono ammesse tolleranze al punto di arresto, così da stimolare la diversità genetica della popolazione, e poiché gli operatori di crossover e mutazione amplificano questa diversità, a valle di questi calcoli è opportuno riportare tutti gli individui al punto di arresto prestabilito. Nello specifico, la correzione è effettuata portando il punto di fermata nei pressi della progressiva L, non nel punto esatto, questo sempre allo scopo di evitare la creazione di *individui cloni* e per stimolare la diversità genetica.

Questa strategia è attuata in modo differente se il treno fermerà in anticipo o in ritardo rispetto al bersaglio, come descritto dall'algoritmo 7.

Algoritmo 7 Correzione

- 1 Input: n cromosomi
 - 2 Per ogni cromosoma i fra 0 e n-1:
 - 3 Se punto di fermata è $< L$: allunga la fase a regime
 - 4 Se punto di fermata è $> L$: intensifica la fase di frenatura
 - 5 Ritorna individuo corretto
-

4.8 Elitismo

L'elitismo è un operatore che ha lo scopo di mantenere nella popolazione, nel corso delle evoluzioni, gli individui valutati come *poco dominati* dal Pareto ranking. A valle dei processi di riproduzione, potrebbe avvenire che i migliori individui della generazione

passata non abbiano trasmesso le loro migliori caratteristiche alla prole e questo porterebbe alla perdita di proprietà positive e di conseguenza anche alla perdita di efficacia computazionale dell'algoritmo. Per evitare questo fenomeno, una volta creata la nuova popolazione *prole*, questa viene combinata con la precedente popolazione allo scopo di creare una *popolazione combinata* di dimensione $2n$, che comprende dunque sia i genitori che i figli. Per la nuova popolazione si riadoperano le funzioni di valutazione e il Pareto ranking e si ottiene così una classificazione della qualità degli individui. Dalla popolazione classificata, di dimensione $2n$, vengono selezionati i primi n individui e questi comporranno la nuova generazione, pronta per i nuovi processi di riproduzione. Questo metodo è utilizzato dalla ricerca [9] nella creazione di un *nonsorting genetic algorithm* detto *NSGA-II*.

Le operazioni svolte per ottenere l'elitismo sono riassunte nell'algoritmo 8.

Algoritmo 8 Elitismo

- 1 Input: n individui genitori (G), n individui prole (P)
 - 2 Crea nuova popolazione $R = G \cup P$
 - 3 Avvio valutazione della popolazione R tramite *l'algoritmo 2 valutazione*;
 - 4 Avvio del Pareto ranking della popolazione R tramite *l'algoritmo 3 pareto*;
 - 5 Dalla popolazione R classificata vengono selezionati i primi n individui
 - 6 Ritorna nuova popolazione
-

5. Risultati

Ora saranno presentati i risultati delle simulazioni effettuate. Allo scopo di individuare lo scenario in cui meglio si applica lo strumento proposto in questa tesi, sono stati esplorati diversi scenari in modo da identificare gli effetti derivanti, ad esempio, dall'imporre una popolazione molto numerosa oppure un alto numero di evoluzioni.

Le diverse scelte porteranno l'algoritmo a spingere le soluzioni verso una direzione piuttosto che un'altra, potendo così identificare le conseguenze dovute alla variazione dei dati di input.

Questi non sono però gli unici dati di input con un impatto nello svolgimento del processo di evoluzione: la velocità minima ammessa per ogni individuo nella fase a regime ha un forte impatto nei risultati poiché rappresenta il limite inferiore di velocità verso la quale si tenderà nel corso delle evoluzioni allo scopo di minimizzare il consumo energetico. Nonostante la ricerca del fronte di Pareto permetta di non prediligere nessun aspetto dei 4 valutati (consumo energetico, tempo di percorrenza, comfort, velocità/sicurezza), ma bensì ricerchi la soluzione ottima generale, si è notato come l'algoritmo genetico prediliga accentuare la minimizzazione del consumo, senza sacrificare esageratamente nessuno degli altri aspetti, tendendo ad abbassare la velocità massima raggiunta dal treno.

Agendo su questo parametro si è in grado di scegliere quanto sacrificio, in termini di velocità, si è disposti ad accettare così da far lavorare il processo di ottimizzazione nello spazio delle soluzioni che noi riteniamo interessanti.

Allo scopo di determinare i parametri che possano fornirci i migliori risultati possibili, sono state avviate numerose simulazioni e si è scelto di concentrare l'attenzione su un particolare numero di evoluzioni e su una fissata grandezza della popolazione, decidendo di variare il terzo parametro precedentemente esposto.

Si è scelta una popolazione di 100 individui da assoggettare a 100 evoluzioni. La velocità minima a regime è stata posta pari a 90 km/h per lo scenario 1 e pari a 100 km/h per lo scenario 2.

5.1. Lo scenario a massime prestazioni

Per poter valutare i risultati, che rappresentano le prestazioni del sistema di trasporto, occorre chiaramente un termine di paragone. Questo è individuato nello scenario in cui il sistema è spinto alle massime prestazioni, ove i treni raggiungono la massima velocità ammessa lungo la linea e perseguono il fine del minor tempo di viaggio.

Questo scenario è stato simulato in Python e ha permesso di ottenere i consumi energetici e i tempi di percorrenza, dapprima delle singole tratte e poi dell'intera infrastruttura.

Si è scelto, in questo scenario, di eliminare il contributo della frenata elettrica rigenerativa, delegando l'onere della frenata ai soli organi meccanici capaci di imprimere decelerazioni più intense rispetto alla frenata elettrica.

Si riportano di seguito i risultati della simulazione dello scenario a massime prestazioni.

Tratta interstazione da Gaytterepe a Havalimani	Lunghezza [m]	Consumo energetico [kWh]	Tempo di percorrenza [s]
S00-S01 GAYTTEREPE-KAGITHANE	3299.235	26,902	162,6
S01-S02 KAGITHANE-HASDAL	5452.789	71,069	227,2
S02-S03 HASDAL-KEMERBURGAZ	5611.888	29,656	232
S03-S04 KEMERBURGAZ-GOKTURK	3129.271	62,04	157,5
S04-S05 GOKTURK-IHSANIYE	9957.668	60,772	362,4
S05-S06 IHSANIYE-HAVALIMANI_2	3864.910	77,973	179,6
S06-S07 HAVALIMANI_2-HAVALIMANI_1	2171.273	49,198	128,8
S07-S08 HAVALIMANI_1-HAVALIMANI_3	2504.784	58,47	138,8

Tabella 13: Simulazione esercizio a massime prestazioni in direzione Gaytterepe - Havalimani

In direzione Gaytterepe – Havalimani si ha un consumo totale di 436,08 kWh e un tempo di percorrenza totale, comprese le soste in stazione, di 28 minuti e 49 secondi.

Vengono adottati tempi di sosta in stazione compresi fra 20 e 25 secondi, si noti che l'algoritmo genera casualmente un tempo di sosta compreso in questo intervallo per le soluzioni ottenute dal processo di ottimizzazione, mentre per l'esercizio a massime prestazioni ipotizza il minimo valore possibile di 20 secondi.

Tratta interstazione da Havalimani a Gaytterepe	Lunghezza [m]	Consumo energetico [kWh]	Tempo di percorrenza [s]
S00-S01 HAVALIMANI_3-HAVALIMANI_1	2504.687	51,511	138,8
S01-S02 HAVALIMANI_1-HAVALIMANI_2	2171.161	44,14	128,8
S02-S03 HAVALIMANI_2-IHSANIYE	3849.224	45,793	179,1
S03-S04 IHSANIYE-GOKTURK	9959.707	47,884	362,4
S04-S05 GOKTURK-KEMERBURGAZ	3121.434	49,716	157,3
S05-S06 KEMERBURGAZ-HASDAL	5610.287	56,988	231,9
S06-S07 HASDAL-KAGITHANE	5476.319	70,967	227,9
S07-S08 KAGITHANE-GAYTTEREPE	3294.510	24,563	162,5

Tabella 14: Simulazione esercizio a massime prestazioni in direzione Havalimani - Gaytterepe

In direzione Havalimani - Gaytterepe si ha un consumo totale di 391,562 kWh e un tempo di percorrenza totale, comprese le soste in stazione, di 28 minuti e 49 secondi.

L'inversione di marcia è effettuata tramite un anello della lunghezza di 910 m e di raggio 125 metri nella stazione Gaytterepe, nella stazione Havalimani invece è effettuata tramite un incrocio dei binari situato fra le stazioni Havalimani 3 e Havalimani 1.

Il tempo necessario all'inversione è valutato in 90 secondi nella stazione Gaytterepe (imponendo una velocità di percorrenza dell'anello di 50 km/h e derivando una velocità media sullo stesso di 40 km/h) e in 60 secondi nella stazione Havalimani, tempo dovuto ai limiti imposti nello scambio che limitano la velocità di percorrenza del treno.

Riassumendo:

Direzione	Tempo di percorrenza [min:sec]	Consumo energetico [kWh]
Gaytterepe-Havalimani	28:49	436,08
Havalimani-Gaytterepe	28:49	391,562
Tempo giro	60:08	827,642

Tabella 15: Consumi e tempi di percorrenza per l'esercizio a massime prestazioni

In queste condizioni la metropolitana opera a una velocità commerciale di 72,73 km/h.

5.2. Scenario 1: n=100, evoluzioni=100, $v_{\min,regime}=90$ km/h

Il primo scenario esplorato è costituito da una popolazione di 100 individui da far evolvere per 100 generazioni. La minima velocità accettata per la fase a regime è di 90 km/h.

Si riportano in tabella 16 i risultati relativi alla soluzione *migliore* del fronte di Pareto per la direzione di percorrenza Gaytterepe - Havalimani. I valori di risparmio energetico e di aumento del tempo di percorrenza sono ricavati dal confronto con i valori relativi all'esercizio a massime prestazioni.

Tratta interstazione da Gaytterepe a Havalimani	Lunghezza [m]	Consumo energetico [kWh]	Risparmio energetico [%]	Tempo di percorrenza [s]	Aumento tempo di percorrenza [%]
S00-S01 GAYTTEREPE-KAGITHANE	3299.235	21,801	18,96%	164,6	1,23%
S01-S02 KAGITHANE-HASDAL	5452.789	32,238	54,64%	266,4	17,25%
S02-S03 HASDAL-KEMERBURGAZ	5611.888	21,056	29,00%	262,9	13,32%
S03-S04 KEMERBURGAZ-GOKTURK	3129.271	33,091	46,66%	166,1	5,46%
S04-S05 GOKTURK-IHSANIYE	9957.668	33,351	45,12%	450,8	24,39%
S05-S06 IHSANIYE-HAVALIMANI_2	3864.910	38,374	50,79%	193,1	7,52%
S06-S07 HAVALIMANI_2-HAVALIMANI_1	2171.273	32,278	34,39%	129,1	0,23%
S07-S08 HAVALIMANI_1-HAVALIMANI_3	2504.784	33,787	42,21%	143,4	3,31%
TOTALE		245,976	43,59%	1776,4	11,80%

Tabella 16: Simulazione scenario 1 in direzione Gaytterepe - Havalimani

Possiamo notare un risparmio energetico totale del 43,59% a fronte di un sacrificio in termini di tempo di percorrenza del 11,80%.

L'algoritmo esporta anche l'orario grafico (figura 34) e il diagramma spazio-velocità (figura 35) relativi alla miglior soluzione del fronte di Pareto. In quest'ultimo si riporta anche l'esercizio a massime prestazioni in rosso.

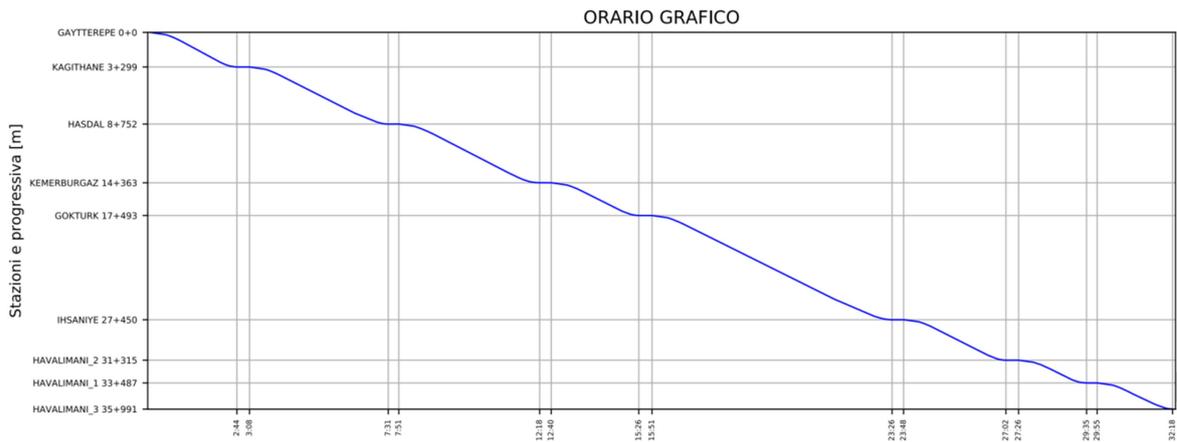


Figura 34: Orario grafico scenario 1 direzione Gaytterepe-Havalimani

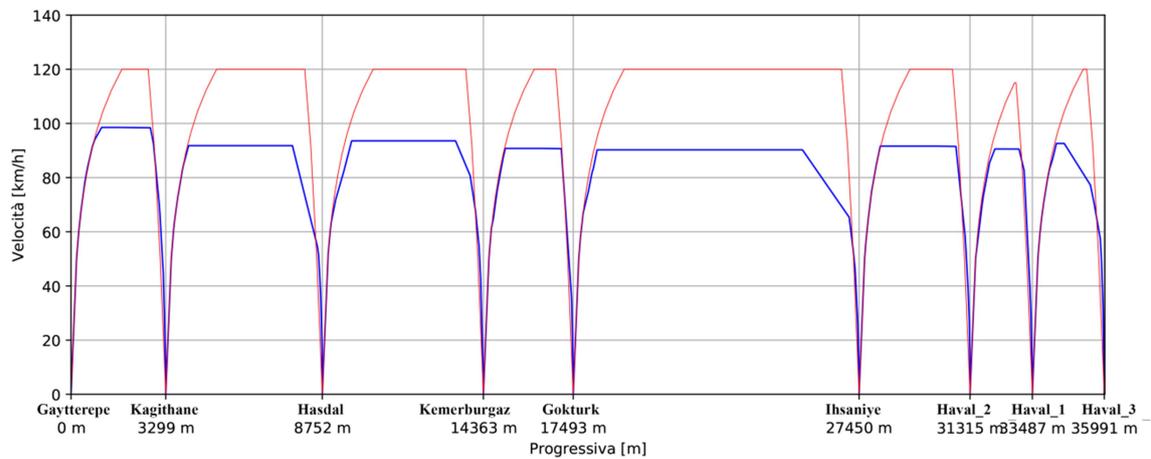


Figura 35: Diagramma Spazio-Velocità scenario 1 direzione Gaytterepe-Havalimani

Risulta interessante focalizzare l'attenzione sulla variazione dei parametri di valutazione nel corso delle generazioni, poiché questo permette di capire se l'algoritmo genetico provochi o meno un effettivo miglioramento della qualità dei risultati.

Si prenda ad esempio il grafico relativo alle funzioni di valutazione del consumo energetico e del tempo di percorrenza di figura 36.

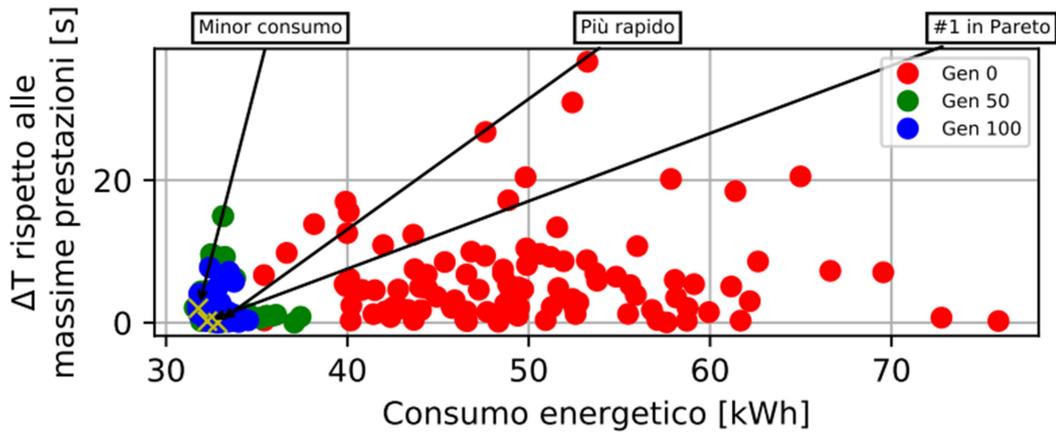


Figura 36: Grafico ΔT -Consumo energetico della tratta Havalimani 2-Havalimani 1 in direzione Gaytterepe-Havalimani

Nel caso della tratta Havalimani 2 – Havalimani 1 in direzione Gaytterepe – Havalimani si nota un netto miglioramento sia dei consumi sia dei tempi di percorrenza (espressi in termini di differenza rispetto alla soluzione a massime prestazioni) nel corso delle evoluzioni.

In rosso sono riportati gli individui generati casualmente all’inizio del processo evolutivo, questi risultano essere molto vari e ben distribuiti nello spazio delle soluzioni. In verde vediamo gli individui della generazione intermedia del processo evolutivo, in questo caso è la generazione numero 50. Questi presentano una drastica diminuzione dei consumi e dei tempi di percorrenza, evidenziando dunque un buon trend evolutivo.

Infine in blu sono rappresentati gli individui della generazione finale, la numero 100.

Si nota una ulteriore contrazione dei consumi e dei tempi di percorrenza, seppur ridotta rispetto a prima. Vediamo dunque dei tempi di percorrenza che vanno ad avvicinarsi a quelli dell’esercizio a massime prestazioni (solo lo 0,23% in più, valore molto basso giustificato dalla brevità del tratto interstazione che non permette il raggiungimento della velocità massima) con consumi energetici ridotti di 1/3.

Questo è giustificato dalla presenza del coasting, assente nell’esercizio a massime prestazioni, che permette una perdita di tempo di percorrenza relativamente bassa nonostante porti a una sensibile diminuzione dei consumi.

Il grafico mette in evidenza tre individui in particolare, i quali risultano essere molto significativi: l’individuo *#1 Pareto* possiede una determinata coppia ΔT -Consumo e si trova in una posizione intermedia rispetto altri due, l’individuo *Più rapido* infatti possiede

minor ΔT e maggior consumo energetico, situazione inversa per l'individuo *Minor consumo* il quale presenta consumo minore e ΔT maggiore.

Risulta chiaro dunque che muovendosi nel set delle soluzioni di Pareto si avrà sempre un guadagno in un parametro di valutazione che sarà sempre accompagnato necessariamente da un sacrificio in un altro. Ciò rappresenta perfettamente il significato del fronte di Pareto. Per la stessa tratta interstazione si riportano ora un ulteriore grafico che evidenzia l'andamento del comfort e del consumo energetico nel corso delle evoluzioni.

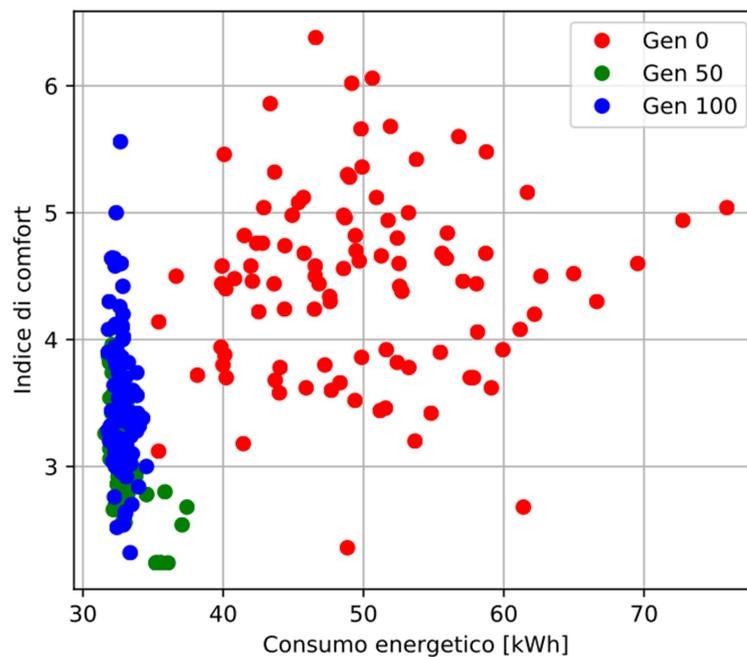


Figura 37: Grafico Comfort-Consumo energetico della tratta Havalimani 2-Havalimani 1 in direzione Gaytterepe-Havalimani

Dalla figura 37 si può osservare come l'evoluzione porti gli individui a minimizzare il consumo energetico e contemporaneamente a massimizzare il comfort di viaggio, infatti minore sarà il valore dell'indice di comfort e minori saranno i contraccolpi subiti dagli utenti lungo il percorso.

Si riportano ora i risultati relativi alla direzione di percorrenza Havalimani – Gaytterepe.

Tratta interstazione da Havalimani a Gaytterepe	Lunghezza [m]	Consumo energetico [kWh]	Risparmio energetico [%]	Tempo di percorrenza [s]	Aumento tempo di percorrenza [%]
S00-S01 HAVALIMANI_3-HAVALIMANI_1	2504.687	33,053	35,83%	141,5	2,54%
S01-S02 HAVALIMANI_1-HAVALIMANI_2	2171.161	28,229	36,05%	129,6	1,25%
S02-S03 HAVALIMANI_2-IHSANIYE	3849.224	29,128	36,39%	193,7	8,21%
S03-S04 IHSANIYE-GOKTURK	9959.707	34,35	28,26%	398,5	10,08%
S04-S05 GOKTURK-KEMERBURGAZ	3121.434	32,192	35,25%	168,1	7,07%
S05-S06 KEMERBURGAZ-HASDAL	5610.287	31,921	43,99%	266,9	15,54%
S06-S07 HASDAL-KAGITHANE	5476.319	34,102	51,95%	256,8	13,13%
S07-S08 KAGITHANE-GAYTTEREPE	3294.510	18,241	25,74%	167,5	3,40%
TOTALE		241,216	38,40%	1722,6	8,75%

Tabella 17: Simulazione scenario 1 in direzione Havalimani - Gaytterepe

In questo caso, rispetto alla precedente direzione di marcia, troviamo un risparmio energetico più contenuto associato ad un aumento del tempo di percorrenza minore. Questo è giustificato dalla indeterminatezza del processo evolutivo che può portare i risultati di ogni simulazione verso valori quantitativamente differenti, seppur qualitativamente simili.

In questo caso è intuitivo capire che avendo sacrificato meno tempo di percorrenza il treno avrà viaggiato a velocità maggiori e avrà consumato una quantità maggiore di energia.

Prendiamo ora ad esempio la tratta compresa fra le stazioni Ihsaniye e Gokturk, la più lunga dell'intera infrastruttura.

In figura 38 vediamo in blu gli individui generati casualmente all'inizio del processo evolutivo, in arancio gli individui della generazione finale e l'esercizio a massime prestazioni in rosso tratteggiato.

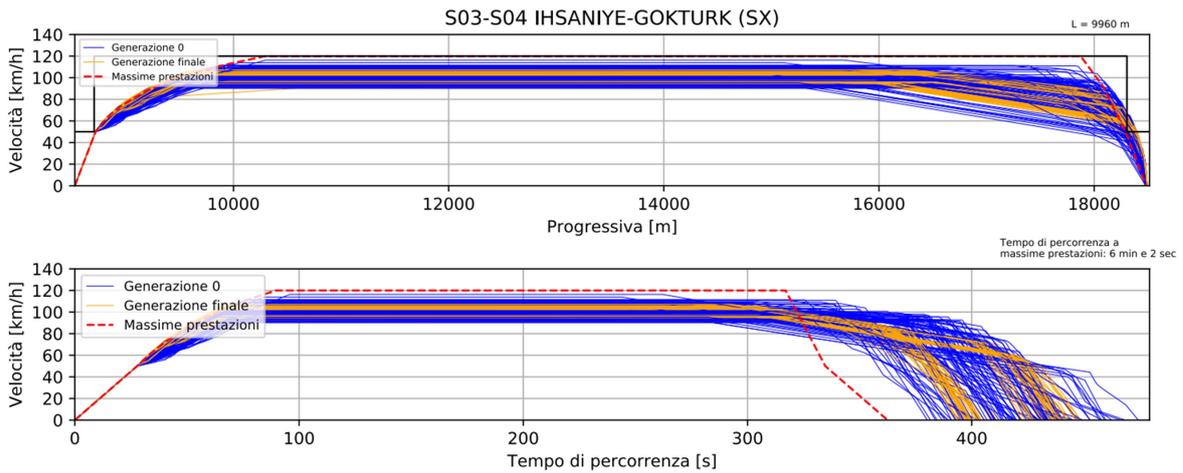


Figura 38: Grafici Spazio-Velocità e Tempo-Velocità della tratta Ihsaniye-Gokturk in direzione Havalimani - Gaytterepe

Possiamo notare la grande varietà di soluzioni presenti nella generazione iniziale, evidente soprattutto in termini di tempi di percorrenza ove gli individui occupano un range compreso fra 380 e 500 secondi, valori sempre maggiori del tempo a massime prestazioni pari a 362 secondi. La generazione finale presenta valori meno dispersi, vicini ai 400 secondi, seppur siano presenti individui con valori anche notevolmente superiori. Anche in questo caso è possibile identificare il fronte di Pareto, vedi figura 39.

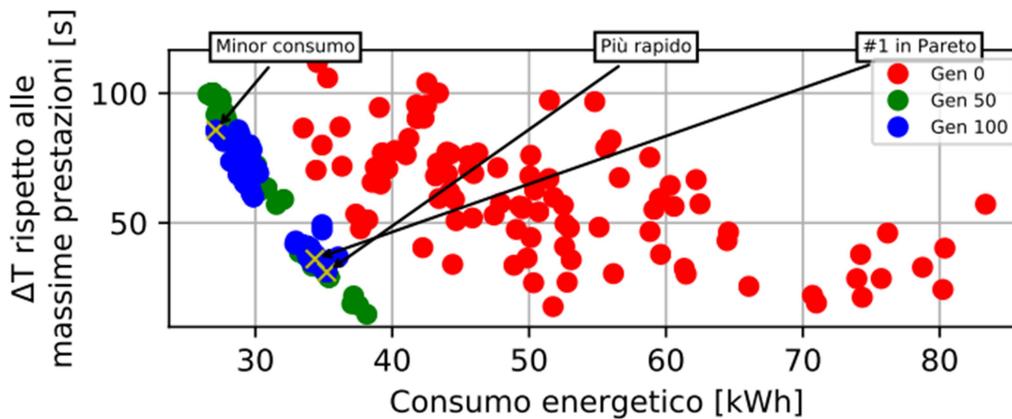


Figura 39: Grafico ΔT -Consumo energetico della tratta Ihsaniye-Gokturk in direzione Havalimani - Gaytterepe

Risulta interessante rappresentare il percorso degli individui più rappresentativi su un grafico spazio-velocità.

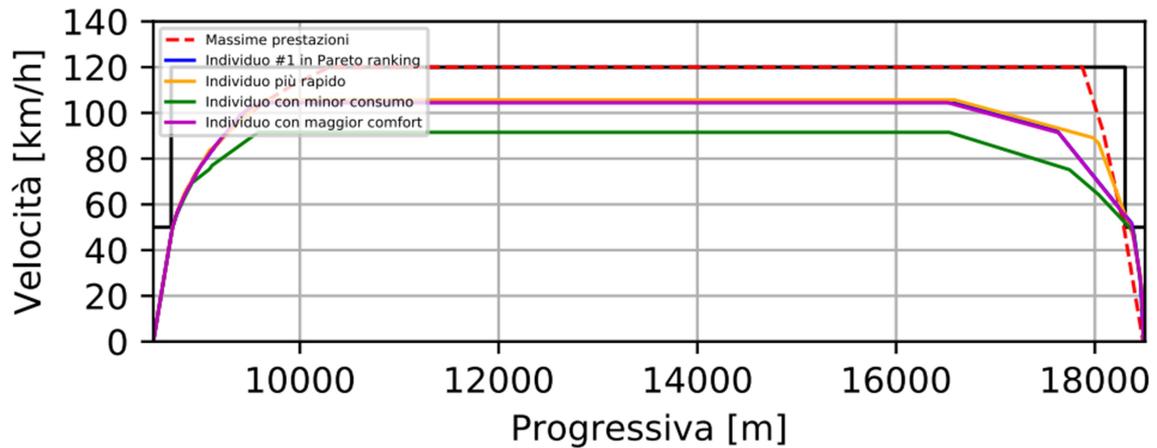


Figura 40: Grafico Spazio-Velocità della tratta Ihsaniye-Gokturk in direzione Havalimani - Gaytterepe

La stessa terna di soluzioni evidenziata in figura 39 è ora rappresentata insieme alla soluzione a massime prestazioni e a quella che presenta maggior comfort, che in questo caso coincide con la soluzione #1 di Pareto.

Appare chiaro anche in questa occasione come la soluzione #1 di Pareto, seppur sia quella valutata come migliore perché *meno superata* dalle altre, sia solo una delle possibili soluzioni adottabili. Infatti la scelta della soluzione da adottare sarà sempre a discrezione del programmatore del servizio e dipenderà dalla volontà di prediligere un aspetto piuttosto che un altro.

Anche per la direzione Havalimani-Gaytterepe si riporta l'orario grafico e il diagramma spazio-velocità relativi alla miglior soluzione del fronte di Pareto.

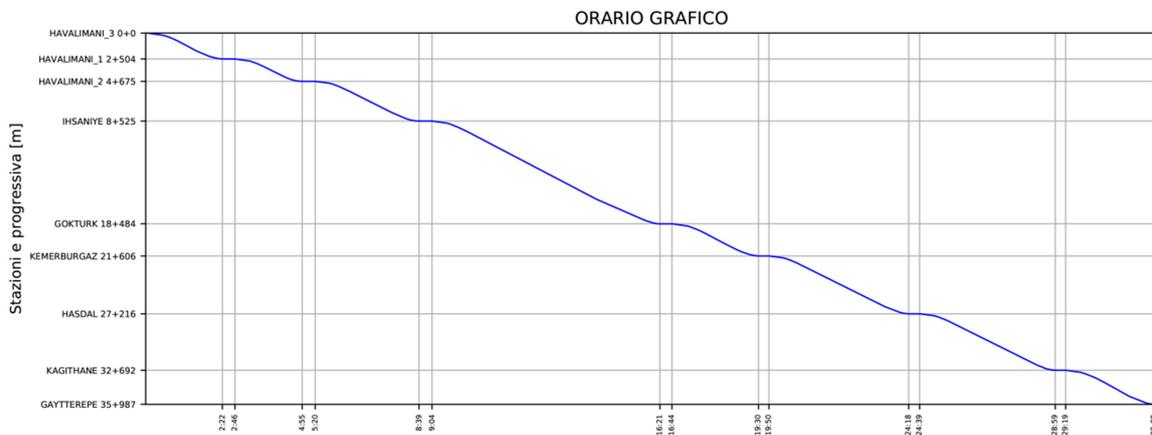


Figura 41: Orario grafico scenario 1 direzione Havalimani-Gaytterepe

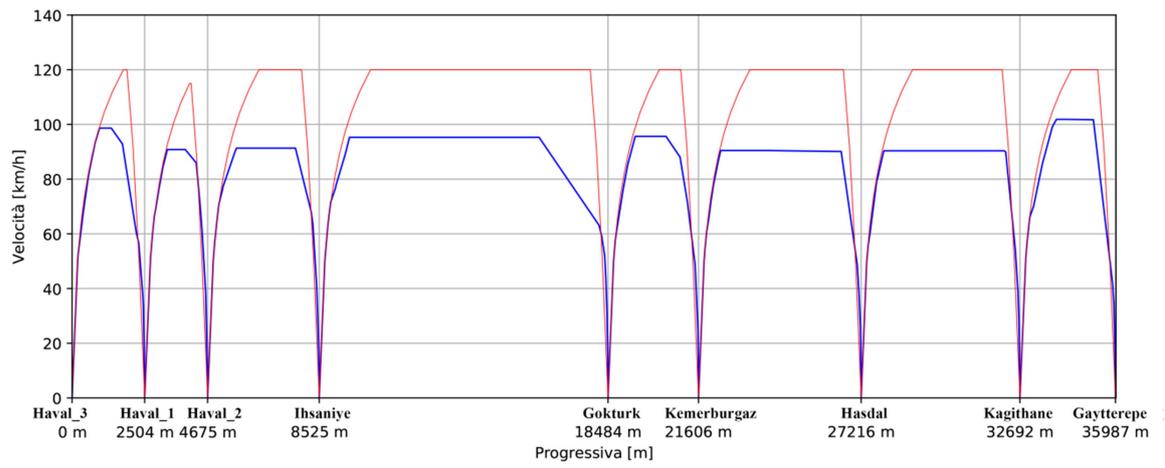


Figura 42: Diagramma Spazio-Velocità scenario 1 direzione Havalimani-Gaytterepe

5.3. Scenario 2: n=100, evoluzioni=100, $v_{\min, regime}=100$ km/h

Il secondo scenario esplorato è costituito da una popolazione di 100 individui da far evolvere per 100 generazioni, così come nel primo scenario. La minima velocità accettata per la fase a regime in questo caso però è di 100 km/h. Lo scopo è cercare soluzioni sicuramente con consumi maggiori rispetto allo scenario 1 ma con minor sacrificio in termini di tempo di percorrenza.

Anche in questo caso i risultati riportati in tabella sono relativi alla soluzione *migliore* del fronte di Pareto. I valori di risparmio energetico e di aumento del tempo di percorrenza sono ricavati dal confronto con i valori relativi all'esercizio a massime prestazioni.

Tratta interstazione da Gaytterepe a Havalimani	Lunghezza [m]	Consumo energetico [kWh]	Risparmio energetico [%]	Tempo di percorrenza [s]	Aumento tempo di percorrenza [%]
S00-S01 GAYTTEREPE-KAGITHANE	3299.235	20,701	23,05%	164,4	1,11%
S01-S02 KAGITHANE-HASDAL	5452.789	41,044	42,25%	245,6	8,10%
S02-S03 HASDAL-KEMERBURGAZ	5611.888	27,05	8,79%	236,7	2,03%
S03-S04 KEMERBURGAZ-GOKTURK	3129.271	42,617	31,31%	169,7	7,75%
S04-S05 GOKTURK-IHSANIYE	9957.668	41,634	31,49%	404,5	11,62%
S05-S06 IHSANIYE-HAVALIMANI 2	3864.910	47,219	39,44%	184,2	2,56%
S06-S07 HAVALIMANI 2-HAVALIMANI 1	2171.273	38,496	21,75%	129,7	0,70%
S07-S08 HAVALIMANI 1-HAVALIMANI 3	2504.784	40,978	29,92%	139,7	0,65%
TOTALE		299,739	31,27%	1674,5	5,39%

Tabella 18: Simulazione scenario 2 in direzione Gaytterepe - Havalimani

Questo scenario ha condotto verso soluzioni con risparmi energetici e aumenti dei tempi di percorrenza più contenuti rispetto allo scenario 1, rispettando dunque le previsioni. Rispetto allo scenario a massime prestazioni i consumi energetici risultano ridotti del 31,27% a fronte di un aumento del tempo di percorrenza del 5,39%.

Anche in questo scenario è possibile identificare il fronte di Pareto, ponendo l'attenzione nuovamente sulla tratta più lunga, la Gokturk-Ihsaniye.

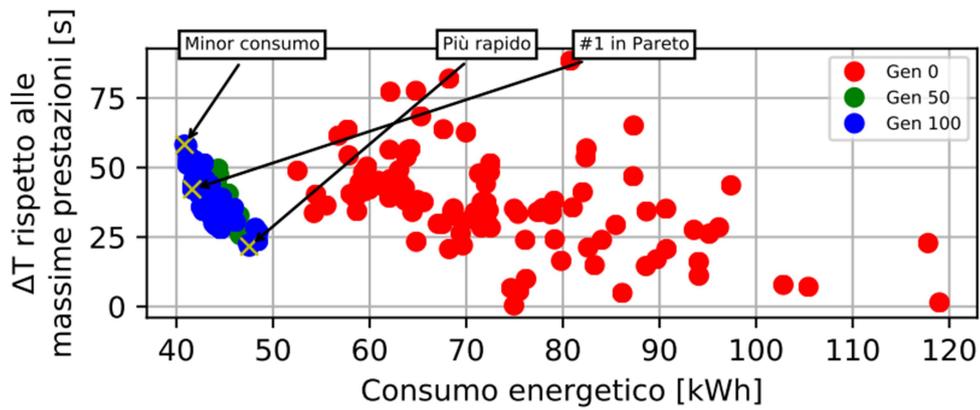


Figura 43: Grafico ΔT -Consumo energetico della tratta Gokturk-Ihsaniye in direzione Gaytterepe-Havalimani

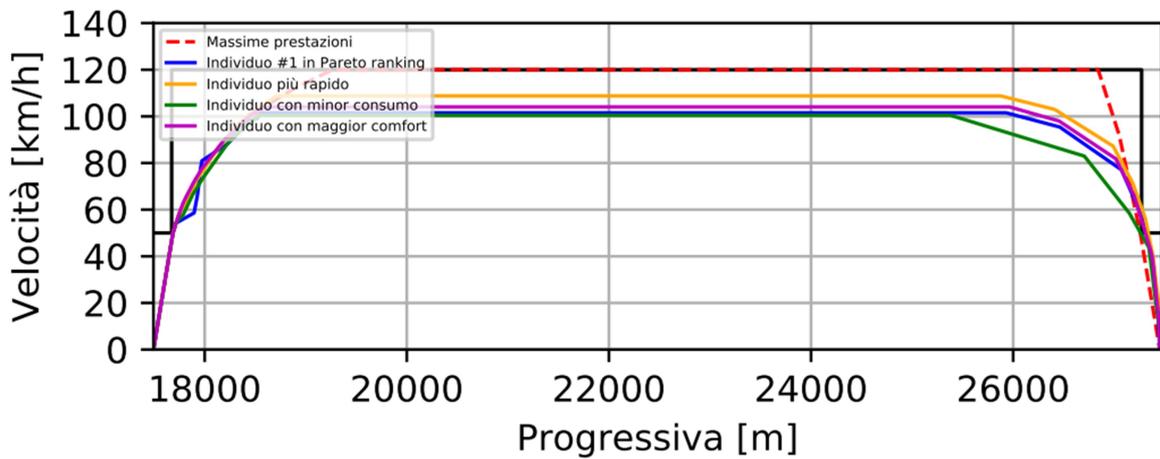


Figura 44: Grafico Spazio-Velocità della tratta Gokturk-Ihsaniye in direzione Gaytterepe-Havalimani

Si riporta ora l'orario grafico e il diagramma spazio-velocità relativi alla miglior soluzione del fronte di Pareto.

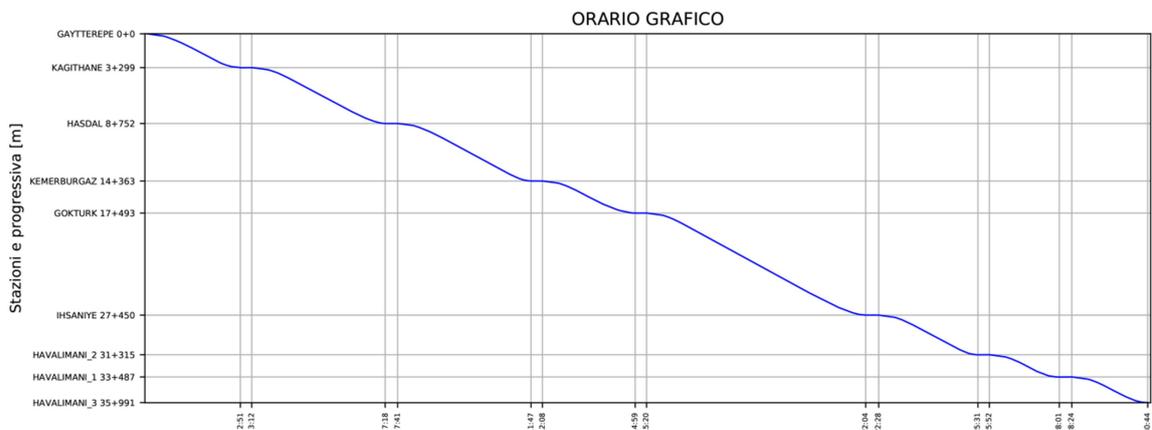


Figura 45: Orario grafico scenario 2 direzione Gaytterepe-Havalimani

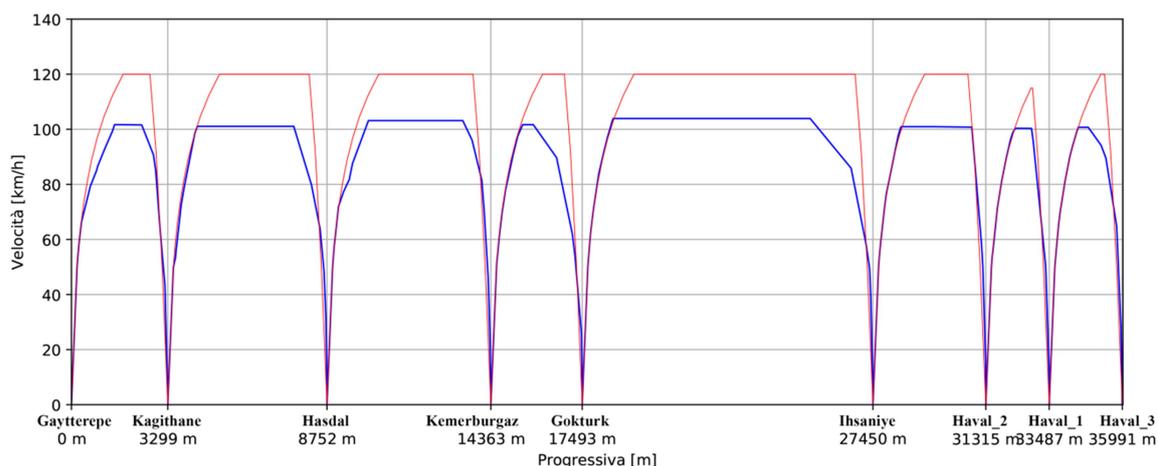


Figura 46: Diagramma Spazio-Velocità scenario 2 direzione Gaytterepe-Havalimani

Rispetto allo scenario 1 si nota una netta differenza nelle velocità della fase a regime. Comprendiamo dunque l'effetto della variazione della velocità minima imposta proprio per la fase di marcia a velocità costante.

Risultati qualitativamente simili sono stati ottenuti nella direzione di marcia opposta.

Tratta interstazione da Havalimani a Gaytterepe	Lunghezza [m]	Consumo energetico [kWh]	Risparmio energetico [%]	Tempo di percorrenza [s]	Aumento tempo di percorrenza [%]
S00-S01 HAVALIMANI_3-HAVALIMANI_1	2504.687	34,276	33,46%	140,1	0,94%
S01-S02 HAVALIMANI_1-HAVALIMANI_2	2171.161	35,299	20,03%	130,3	1,16%
S02-S03 HAVALIMANI_2-IHSANIYE	3849.224	34,955	23,67%	186,1	3,91%
S03-S04 IHSANIYE-GOKTURK	9959.707	31,942	33,29%	424,9	17,25%
S04-S05 GOKTURK-KEMERBURGAZ	3121.434	36,733	26,11%	158,7	0,89%
S05-S06 KEMERBURGAZ-HASDAL	5610.287	41,28	27,56%	272,3	17,42%
S06-S07 HASDAL-KAGITHANE	5476.319	44,599	37,16%	249,9	9,65%
S07-S08 KAGITHANE-GAYTTEREPE	3294.510	18,226	25,80%	166,2	2,28%
TOTALE		277,31	29,18%	1728,5	8,80%

Tabella 19: Simulazione scenario 2 in direzione Havalimani - Gaytterepe

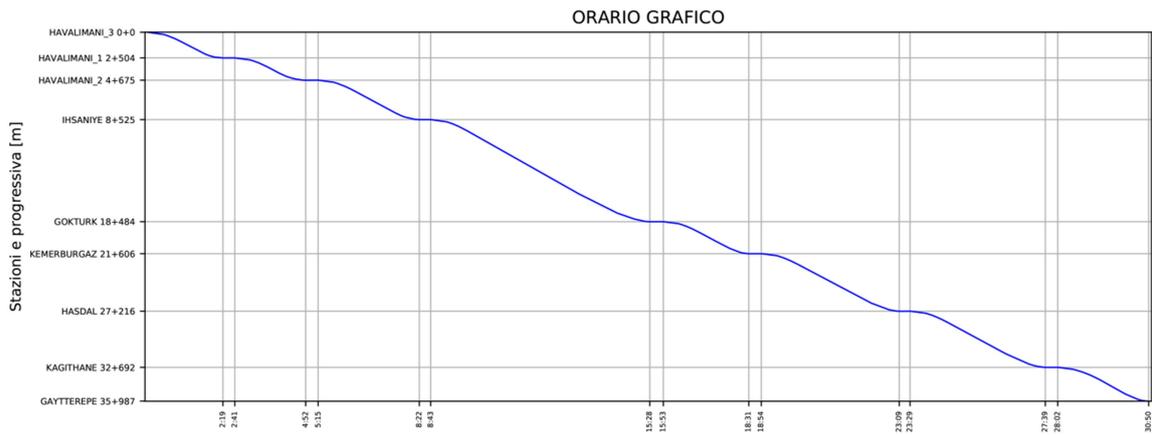


Figura 47: Orario grafico scenario 2 direzione Havalimani-Gaytterepe

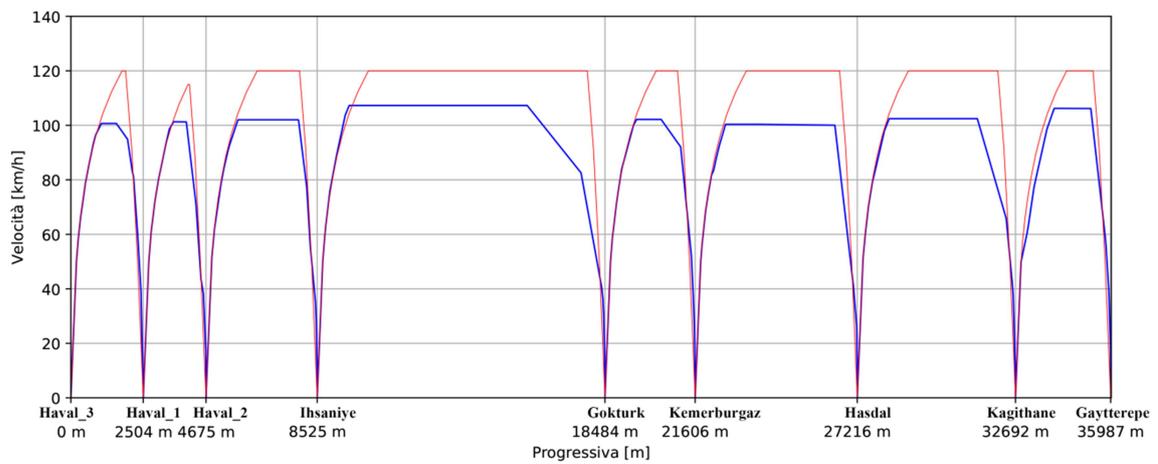


Figura 48: Diagramma Spazio-Velocità scenario 2 direzione Havalimani-Gaytterepe

I risultati in direzione Havalimani-Gaytterepe confermano quanto visto nella direzione opposta: imporre una maggiore velocità minima porta una contrazione sia dei risparmi energetici sia dei tempi di percorrenza.

6. Conclusione

Questa tesi ha avuto l'obiettivo di studiare e proporre la programmazione di un servizio di trasporto metropolitano ad automazione integrale. Questa tipologia di sistema di trasporto si pone nel mercato della mobilità urbana, specie delle grandi città, indiscutibilmente al primo posto in quanto capace di rispondere alla domanda di mobilità più alta ed esigente, quale è la domanda in contesto urbano, riuscendo a essere allo stesso tempo affidabile ed efficiente. Questo perché le caratteristiche di una metropolitana di questa tipologia, come la sede riservata, l'automazione e l'assenza del fattore umano, l'alta precisione delle fermate in stazione e la totale elettrificazione, permettono di mantenere nel tempo uno standard qualitativo irraggiungibile per tutti gli altri sistemi di trasporto pubblico urbano.

Nonostante la grande efficacia di questi sistemi di trasporto occorre porre attenzione alla indiscutibile limitatezza delle risorse a nostra disposizione. La moderna consapevolezza di questo aspetto rende quindi necessario non farsi bastare le performance attuali e ci spinge a studiare ed esplorare scenari che possano ulteriormente migliorare questi sistemi.

Grazie alla collaborazione della società *Geodata* si è potuto disporre di tutte le informazioni necessarie a modellizzare e comprendere la struttura di una moderna linea metropolitana, la linea M11 Gaytterepe-Havalimani di Istanbul attualmente in costruzione. Questa opportunità è stata fin dall'inizio uno stimolo per cercare di impostare il problema della programmazione del servizio di trasporto in una maniera più moderna.

Si è scelto quindi di abbandonare la consueta strada, adottata in precedenti lavori che affrontano problemi simili, che vede impostare a tavolino alcuni parametri e successivamente esplorare, per tentativi, i risultati agendo in modo deterministico sui parametri fondamentali.

Si è invece perseguita la strada della ottimizzazione multi obiettivo, approccio tipico della ricerca operativa, in particolare adottando un algoritmo evolutivo di tipo genetico. Nel mondo accademico sono numerose le ricerche che seguono questa strada per ottimizzare il funzionamento di una metropolitana automatica, buona parte però risultano essere trattazioni molto teoriche non sempre applicabili a contesti reali.

Per non cadere in questa limitazione si è scelto di costruire un algoritmo ad hoc che potesse fornire risultati validi sia teoricamente che praticamente. Questa scelta è stata giustificata anche dalla difficoltà nel reperire algoritmi già esistenti i quali permettessero un forte controllo nei dati iniziali e nei risultati finali.

Si è costruito quindi da zero un algoritmo capace di generare soluzioni pseudo-casuali, ma sempre applicabili e coerenti con i vincoli operativi della linea, per ogni tratta interstazione. Le soluzioni sono state poi assoggettate ai processi evolutivi, applicati tramite operatori, di crossover e di mutazione, anch'essi costruiti per lo scopo e parte fondamentale del funzionamento dell'intero processo.

I risultati ottenuti per ogni porzione di infrastruttura sono stati uniti in modo da ottenere l'intero percorso di un treno lungo la linea.

Il metodo utilizzato in questa tesi è chiaramente generalizzabile e attuabile in altri ambiti, anche distanti dal mondo dell'ingegneria dei trasporti. È infatti molto comune rivolgersi a processi di ottimizzazione multi-obiettivo per risolvere problemi complessi. Si riporta di seguito un diagramma che schematizza le fasi che costituiscono il metodo applicato.

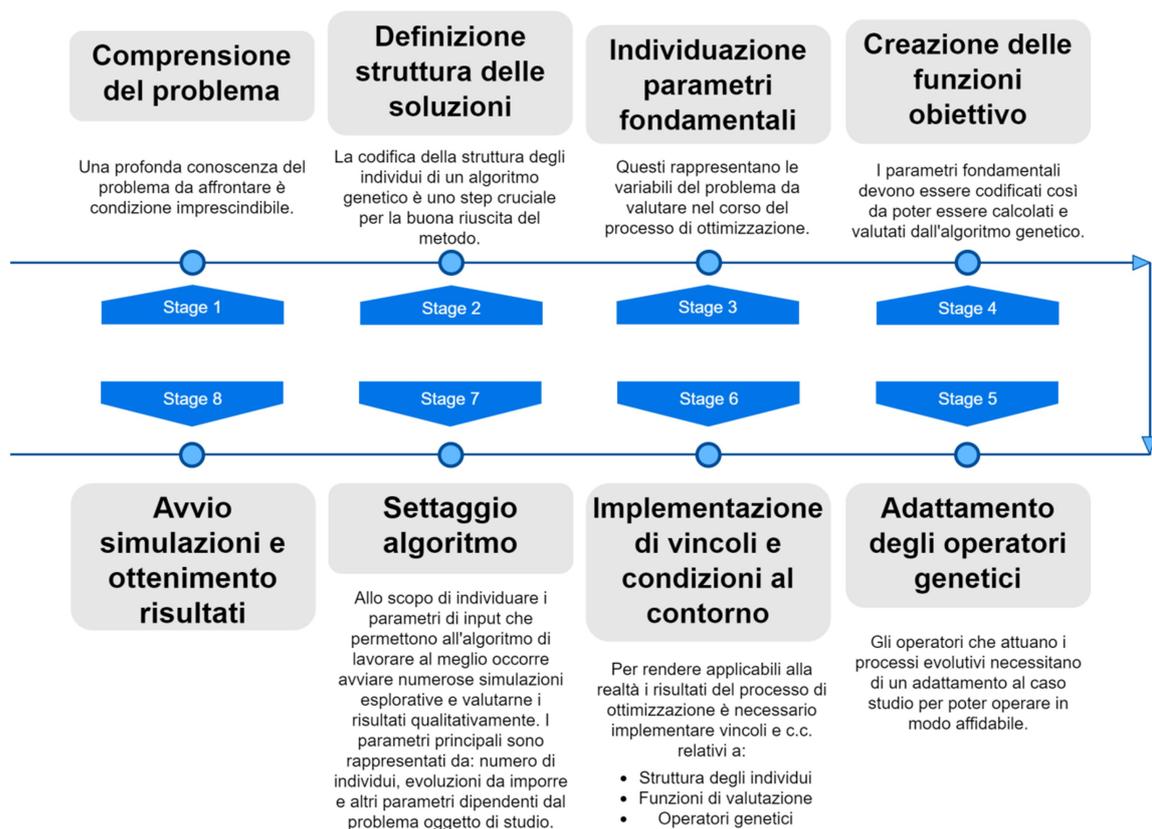


Figura 49: Schematizzazione del metodo applicato

Nella successive tabelle sono riassunti i risultati ottenuti dagli scenari 1 e 2. Vengono inoltre inseriti i risultati derivanti da ulteriori 2 scenari esplorati: lo scenario 3 avente 200 individui e 100 generazioni e lo scenario 4 avente 100 individui e 200 generazioni; entrambi impongono una velocità minima a regime di 100 km/h. Tali scenari non sono stati presentati nel precedente capitolo poiché i risultati non presentano differenze sostanziali rispetto allo scenario 2 con cui condividono la velocità minima a regime, unico parametro la cui variazione determina differenze rilevanti nei risultati.

Direzione→	Gaytterepe-Havalimani		Havalimani-Gaytterepe	
Scenario↓	kWh	tempo	kWh	tempo
Massime prestazioni	436,08	1588,9	391,562	1588,7
1	245,976	1776,4	241,216	1722,6
2	299,739	1674,5	277,31	1728,5
3	303,591	1679,7	275,445	1695,1
4	297,459	1708,4	278,406	1660

Tabella 20: Consumi e tempi di percorrenza degli scenari esplorati

	Risparmio energetico [%]		Tempo di percorrenza aggiuntivo [%]	
	Gaytterepe-Havalimani	Havalimani-Gaytterepe	Gaytterepe-Havalimani	Havalimani-Gaytterepe
Scenario 1	43,59	38,40	11,80	8,43
Scenario 2	31,27	29,18	5,39	8,80
Scenario 3	30,38	29,65	5,71	6,70
Scenario 4	31,79	28,90	7,52	4,49

Tabella 21: Risparmi energetici e tempi di percorrenza aggiuntivi degli scenari esplorati rispetto all'esercizio a massime prestazioni

I risultati espressi in tabella 20 e 21 sono rappresentati in figura 50 e 51 per una più immediata interpretazione.

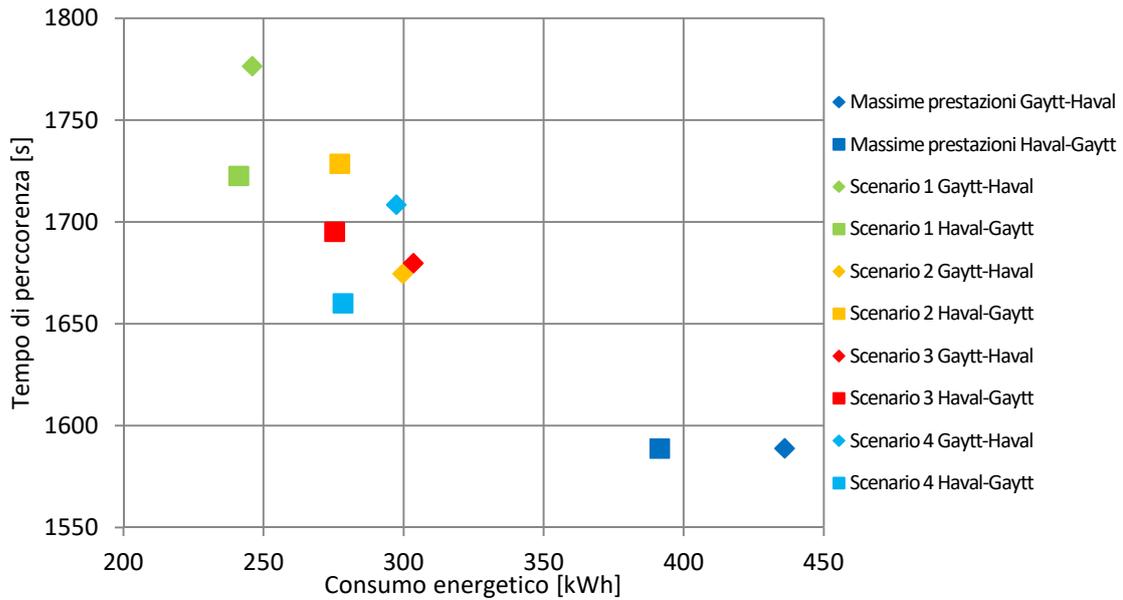


Figura 50: Diagramma Consumi-Tempi di percorrenza degli scenari esplorati

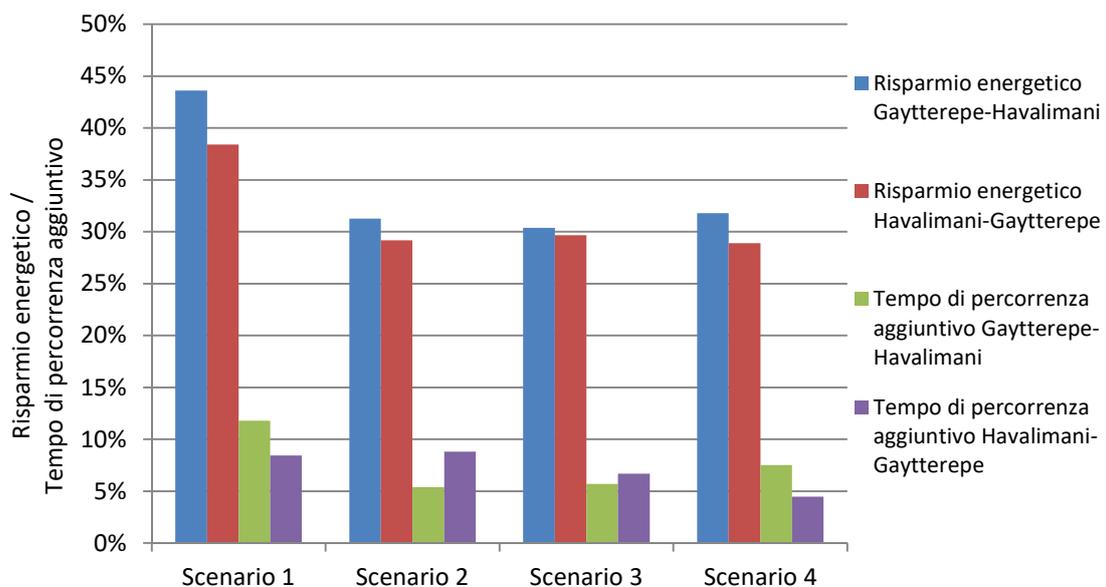


Figura 51: Istogramma dei risparmi energetici e dei tempi di percorrenza aggiuntivi degli scenari esplorati rispetto all'esercizio a massime prestazioni

I risultati evidenziano, come già detto nel capitolo *Risultati*, una buona efficacia dell'algoritmo che riesce ad ottenere consistenti risparmi energetici a fronte di piccoli aumenti dei tempi di percorrenza. Il rapporto fra questi due parametri appare molto positivo (5-10% di tempo in più per ottenere circa il 30% di risparmio energetico) e ciò ci permette di giudicare positivamente tali risultati.

Per quanto riguarda gli scenari aggiuntivi 3 e 4, notiamo piccole differenze nei risultati rispetto allo scenario 2, imputabili maggiormente alla naturale variabilità del processo

evolutivo piuttosto che ai differenti parametri di input. Per tale motivo si è ritenuto superfluo esporre dettagliatamente ulteriori scenari (con differenti grandezze della popolazione e del numero di evoluzioni) oltre ai due presentati nel precedente capitolo.

Si è ritenuto invece molto rilevante la scelta del terzo parametro, la velocità minima ammessa nella fase di regime: basti vedere la differenza nei risultati degli scenari 1 e 2 per capire come entrambi possano rappresentare una buona soluzione alternativa allo scenario a massime prestazioni, a patto di determinare quale aspetto si voglia prediligere maggiormente fra il contenimento dei consumi energetici e la rapidità del servizio offerto.

Raggiungere riduzioni dei consumi del circa 30%, con solo il 5% in più di tempo di viaggio è una possibilità che ogni gestore di un servizio metropolitano vorrebbe esplorare.

Occorre però definire alcuni aspetti che non tolgono credibilità a questi risultati ma che ne rimandano l'applicabilità a scenari futuri nella quale lo strumento sviluppato in questa tesi verrà ulteriormente migliorato e affinato.

In primis si è studiato il percorso di un singolo treno isolato nel suo esercizio. Questa modellizzazione, necessaria a semplificare lo sviluppo dell'algoritmo, pone dei dubbi in particolare su un aspetto fondamentale: l'effettiva utilizzabilità dell'energia recuperata in fase di frenata elettrica rigenerativa. Infatti nella maggior parte delle metropolitane che supportano tale pratica questa energia risulta utilizzabile solo quando, contemporaneamente al treno in decelerazione, vi è un altro treno, nella stessa porzione di linea, che sta accelerando e che può quindi utilizzare l'energia fornita dal treno in frenata. Se non è presente alcun treno in accelerazione, l'energia recuperata viene dissipata tramite dispositivi appositi che la trasformano in calore.

Vi sono studi in materia che propongono dispositivi di immagazzinamento dell'energia a bordo tramite batterie o condensatori, questi però non sono ancora applicati nella pratica per due motivi: per l'aumento di massa del treno che provoca un aumento dei consumi in condizioni di esercizio standard e per i dubbi sul ritorno di un investimento di questo tipo.

Un ulteriore approfondimento necessario a validare i risultati riguarda l'esercizio a massime prestazioni sviluppato in questo lavoro: allo scopo di avere un confronto il più attendibile possibile, occorrerebbe essere in possesso del reale profilo d'esercizio ideato per questa linea metropolitana, in particolare per quanto riguarda l'uso della frenata elettrica sopra citata. La struttura degli individui proposta in questo studio vede le fasi di frenata elettrica e di frenata meccanica operare in modo separato, una di seguito all'altra. Inoltre assume che nelle condizioni di massime prestazioni, in cui il sistema cerca il minor tempo di percorrenza raggiungibile, il treno viene spinto alla massima velocità di regime

ammessa sino ad un punto nella quale iniziare la frenata meccanica al massimo della sua intensità, posta in $1,1 \text{ m/s}^2$. Viene quindi trascurata la frenata elettrica e di conseguenza un eventuale recupero energetico, che nella realtà potrebbe essere contemplato anche in tale scenario di esercizio, per esempio applicando in contemporanea sia la frenata elettrica che quella meccanica.

Queste considerazioni, come detto, sono necessarie e preziose poiché mettono in luce da una parte i limiti di uno strumento ancora grezzo allo stato attuale, ma dall'altra evidenziano una grandissima potenzialità ancora da sviluppare.

Un approfondimento di questa trattazione potrebbe portare lo strumento a essere applicabile e affidabile, ad esempio implementando l'esercizio di più treni in contemporanea, agendo sui tempi di headway e sui tempi di sosta in modo da coordinare le fasi di frenata e di accelerazione dei vari treni.

In questo modo si massimizzerebbe il recupero di energia ma soprattutto si aumenterebbe l'utilizzabilità di tale energia, scongiurando quella che, allo stato attuale, è la soluzione più praticata e meno gradita a tutti: sprecare energia.

Indice delle figure

Figura 1 - Popolazione urbana e rurale dal 1950 al 2030.....	9
Figura 2 - Crescita globale della popolazione urbana è alimentata dalla crescita delle città [a].....	9
Figura 3 - Capacità orario per mezzo di trasporto.....	13
Figura 4 - Illustrazione di un treno a Praed Street Junction, Londra 1863.....	15
Figura 5 - Monorotaia di tipo Alweg, Torino 1961.....	16
Figura 6 - Vettura VAL 208 della Metropolitana di Torino.....	17
Figura 7 - Crescita delle metro automatiche nel mondo (km di linee).....	17
Figura 8 - Impatto dei consumi energetici dei trasporti sui consumi totali in UE, 2006.....	21
Figura 9: Valori medi dei coefficienti di aderenza in campo ferroviario [10]	24
Figura 10: Relazioni fra potenza, coppia motrice e trazione [11]	25
Figura 11: Scomposizione forza peso per un veicolo su tratto in pendenza	28
Figura 12: Diagramma del moto con indicazione delle fasi.....	31
Figura 13: Consumi energetici con e senza fase di coasting [14]	33
Figura 14: Nuovo aeroporto di Istanbul	36
Figura 15: Tracciato della metropolitana M11 Gaytterepe – Havalimani (Nuovo aeroporto).....	37
Figura 16: Diagramma pendenza longitudinale-progressiva.....	40
Figura 17: Sforzo di trazione in funzione della velocità per 1 veicolo	42
Figura 18: Sforzo di frenatura in funzione della velocità per 1 veicolo	42
Figura 19: Curva di accelerazione in funzione della velocità per 1 veicolo	43
Figura 20: Codifica del cromosoma	48
Figura 21: Crossover.....	48
Figura 22: Parametri del tratto interstazione	49
Figura 23: Caratteristiche e risultati dei 3 esperimenti.....	49
Figura 24: Trend della funzione fitness, profilo di marcia e accelerazioni dei 3 esperimenti.....	49
Figura 25: Progettazione integrata vs Progettazione non integrata	50
Figura 26: Diagramma di flusso del GA	51
Figura 27: Overlap fra treno in trazione treno in frenata rigenerativa	52
Figura 28: Flowchart del GA	52
Figura 29 Confronto fra profilo di marcia corrente e ottimizzato	53
Figura 30 Flowchart del NS-GSA	54
Figura 31 Comparazione fra strategia di guida attuale e ottimizzata	54
Figura 32 Diagramma di flusso dell'algoritmo genetico	56

Figura 33: Rappresentazione del cromosoma	59
Figura 34: Orario grafico scenario 1 direzione Gaytterepe-Havalimani	73
Figura 35: Diagramma Spazio-Velocità scenario 1 direzione Gaytterepe-Havalimani	73
Figura 36: Grafico ΔT -Consumo energetico della tratta Havalimani 2-Havalimani 1 in direzione Gaytterepe-Havalimani	74
Figura 37: Grafico Comfort-Consumo energetico della tratta Havalimani 2-Havalimani 1 in direzione Gaytterepe-Havalimani	75
Figura 38: Grafici Spazio-Velocità e Tempo-Velocità della tratta Ihsaniye-Gokturk in direzione Havalimani - Gaytterepe	77
Figura 39: Grafico ΔT -Consumo energetico della tratta Ihsaniye-Gokturk in direzione Havalimani - Gaytterepe	77
Figura 40: Grafico Spazio-Velocità della tratta Ihsaniye-Gokturk in direzione Havalimani - Gaytterepe	78
Figura 41: Orario grafico scenario 1 direzione Havalimani-Gaytterepe	78
Figura 42: Diagramma Spazio-Velocità scenario 1 direzione Havalimani-Gaytterepe	79
Figura 43: Grafico ΔT -Consumo energetico della tratta Gokturk-Ihsaniye in direzione Gaytterepe- Havalimani	81
Figura 44: Grafico Spazio-Velocità della tratta Gokturk-Ihsaniye in direzione Gaytterepe- Havalimani	81
Figura 45: Orario grafico scenario 2 direzione Gaytterepe-Havalimani	81
Figura 46: Diagramma Spazio-Velocità scenario 2 direzione Gaytterepe-Havalimani	82
Figura 47: Orario grafico scenario 2 direzione Havalimani-Gaytterepe	83
Figura 48: Diagramma Spazio-Velocità scenario 2 direzione Havalimani-Gaytterepe	83
Figura 49: Schematizzazione del metodo applicato	85
Figura 50: Diagramma Consumi-Tempi di percorrenza degli scenari esplorati	87
Figura 51: Istogramma dei risparmi energetici e dei tempi di percorrenza aggiuntivi degli scenari esplorati rispetto all'esercizio a massime prestazioni	87

Indice delle tabelle

Tabella 1: Valori di resistenza unitaria medi per veicoli ferroviari e stradali [10]	26
Tabella 2: Valori delle costanti a e b della formula di Von Röckl [10]	29
Tabella 3: Caratteristiche delle fasi del moto	30
Tabella 4: Equazioni cinematiche del moto uniformemente accelerato.....	32
Tabella 5: Equazioni cinematiche del moto a velocità costante.....	33
Tabella 6: Caratteristiche linea M11 Gaytterepe - Havalimani.....	38
Tabella 7: Stazioni e relative quote progressive in direzione Havalimani	38
Tabella 8: Stazioni e relative quote progressive in direzione Gaytterepe	39
Tabella 9: Caratteristiche altimetriche del tracciato in direzione Gaytterepe-Havalimani	39
Tabella 10: Caratteristiche planimetriche del tracciato in direzione Gaytterepe-Havalimani.....	40
Tabella 11: Caratteristiche veicoli impiegati sulla linea	41
Tabella 12: Dati di input dell'algoritmo	57
Tabella 13: Simulazione esercizio a massime prestazioni in direzione Gaytterepe - Havalimani ...	70
Tabella 14: Simulazione esercizio a massime prestazioni in direzione Havalimani - Gaytterepe ...	71
Tabella 15: Consumi e tempi di percorrenza per l'esercizio a massime prestazioni.....	71
Tabella 16: Simulazione scenario 1 in direzione Gaytterepe - Havalimani	72
Tabella 17: Simulazione scenario 1 in direzione Havalimani - Gaytterepe	76
Tabella 18: Simulazione scenario 2 in direzione Gaytterepe - Havalimani	80
Tabella 19: Simulazione scenario 2 in direzione Havalimani - Gaytterepe	82
Tabella 20: Consumi e tempi di percorrenza degli scenari esplorati.....	86
Tabella 21: Risparmi energetici e tempi di percorrenza aggiuntivi degli scenari esplorati rispetto all'esercizio a massime prestazioni	86

Bibliografia

1. Liang, Y., Liu, H., Qian, C., Wang, G.: A modified genetic algorithm for multi-objective optimization on running curve of automatic train operation system using penalty function method. *Int. J. Res.*, 17, 74-87 (2019)
2. Kampeerawar, W., Koseki, T., Zhou, F.: Efficient urban railway design integrating train scheduling, onboard energy storage and traction power management. The 2018 International Power Electronics Conference
3. Wang, H., Yang, X., Wu, J., Sun, H., Gao, Z.: Metro timetable optimization for minimising carbon emission and passenger time: a bi-objective integer programming approach. *EIT intel. Transp. Syst.*, Vol. 12 Iss. 7, 673-681 (2018)
4. Zhou, Y., Bai, Y., Li, J., Mao, B., Li, T.: Integrated optimization on train control and timetable to minimize net energy consumption of metro lines. *Journal of Advanced Transportation*, article ID 7905820, 19 pagine (2018)
5. Yang, S., Wu, J., Yang, X., Liao, F., Li, D., Wei, Y.: Analysis of energy consumption reduction in metro system using rolling stop-skipping patterns. *Computer & Industrial Engineering*, 127, 129-142 (2019)
6. Huang, Y., Yang, L., Tang, T., Gao, Z., Cao, F., Li, K.: Train speed profile optimization with on-board energy storage devices: a dynamic programming based approach. *Computer & Industrial Engineering*, 126, 149-164 (2018)
7. Gao, Y., Yang, L., Gao, Z.: Energy consumption and travel time analysis for metro lines with express/local mode. *Transportation Research Part D* 60, 7-27 (2018)
8. Konak, A., Coit, D.W., Smith, A.E.: Multi-objective optimization using genetic algorithm: A tutorial. *Reliability Engineering and System Safety*, 992-1007 (2006)
9. Deb, K., Agrawal, S., Pratap, A., Meyarivan, T.: A fast elitist nondominated sorting genetic algorithm for multi-objective optimization: NSGA-II. Sixth international conference on parallel problem solving from nature, Paris (2000)
10. Dalla Chiara, B., Pede, G., Valentini, M.P., Coviello N., Deflorio, F.: *Trasporti terrestri ed energia*. Collana Ingegneria dei Trasporti, EGAF (2018)
11. Bassani M., *Dispense per l'insegnamento di "Infrastrutture Viarie"*, Politecnico di Torino, 2015;

12. Dalla Chiara, B.: Dispense di Sistemi di trasporto ferroviari, metropolitani e a fune. DIATI, Politecnico di Torino (2018);
13. Tverberg, g.: World energy consumption in charts since 1820, www.ourfinetword.com (2012);
14. Dalla Chiara B., *Dispense per l'insegnamento di "Tecnica ed economia dei trasporti"*, Politecnico di Torino, 2016;

Sitografia

- a. World Urbanization Prospects, Department of Economic and Social Affairs of the United Nations (2014): <https://esa.un.org/unpd/wup/>
- b. Statistiche sull'energia rinnovabile, EUROSTAT 2016: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Renewable_energy_statistics/it
- c. Piano d'azione per la mobilità urbana: http://europa.eu/rapid/press-release_MEMO-09-424_it.htm
- d. Libro bianco dei trasporti: <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2011:0144:FIN:IT:PDF>
- e. Articolo sul nuovo aeroporto di Istanbul :<https://www.ilpost.it/2019/04/15/il-nuovo-ambizioso-aeroporto-di-istanbul/>