



POLITECNICO DI TORINO

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA CIVILE

TESI DI LAUREA

CRITERI DI PROGETTAZIONE DI UNA METROPOLITANA CON RELATIVO SERVIZIO

SIMULAZIONE DELLA NUOVA LINEA PER L' AEROPORTO DI ISTANBUL

Relatore

Prof. Ing. Bruno Dalla Chiara

Co-relatore

Ing. Nicola Coviello

Relatore esterno

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

Candidato

Davide Besutti

N° matr. 229636

Dicembre 2017

Ringraziamenti

Grazie alla mia famiglia, per avermi appoggiato sia economicamente che moralmente, consigliandomi e spronandomi sempre a dare il meglio.

Grazie alla mia ragazza Benedetta, che ha sempre creduto in me, dandomi la forza di completare questo percorso di studi. Grazie per essermi sempre stata accanto, senza di te questi due anni non sarebbero stati così speciali.

Grazie ai miei coinquilini di Maison Galliano, con voi ho condiviso ben più di un appartamento, abbiamo condiviso delle esperienze, dagli zuccherini ai film, dalle cene con gli amici alle disperazioni per gli esami.

Grazie ai miei amici e compagni di corso, per i momenti passati assieme, per le grigliate e per le serate San Salvator, ma soprattutto per aver condiviso con me successi e insuccessi in questi due anni di università.

Grazie allo studio Geodata ed in particolare all'Ing. Federica Danise, per la disponibilità ed il continuo supporto fornitomi nella stesura di questa tesi.

Grazie infine al mio professore l'Ing. Bruno Dalla Chiara, per la fiducia in me riposta nella realizzazione di questa tesi e all'Ing. Coviello per le utili indicazioni e per il tempo dedicatomi.

INDICE

PREFAZIONE	12
1 INTRODUZIONE.....	14
1.1 Evoluzione dei trasporti.....	14
1.2 Tipologie di trasporto pubblico urbano	18
1.3 Metropolitane automatiche.....	21
1.3.1 Sistemi automatici.....	23
1.3.2 Localizzazione dei treni e comunicazione terra-treno	23
1.3.3 Blocco fisso e blocco mobile	25
1.3.4 Sicurezza	27
1.3.5 Pro e contro di metropolitane automatiche (GoA 4).....	28
1.3.6 Metropolitane automatiche nel mondo	29
1.3.7 Caratteristiche principali delle linee esistenti	30
1.4 Letteratura in materia	33
1.4.1 Benefici dell'automazione	33
1.4.2 Ostacoli dell'automazione	34
2 MODELLAZIONE.....	37
2.1 Principi di modellazione.....	37
2.1.1 Infrastruttura	38
2.1.2 Materiale rotabile.....	39
2.1.3 Orari	40
2.1.4 Simulazione	40
2.1.5 Altre funzioni.....	41

2.2	Funzionamento di OpenTrack	43
2.2.1	Infrastruttura	43
2.2.2	Materiale rotabile	45
2.2.3	Orari e percorsi	50
2.2.4	Simulazione	51
2.2.5	Output	53
3	MODELLAZIONE PROGETTO DEFINITIVO.....	54
3.1	Linea oggetto di studio	54
3.1.1	Sviluppo della rete metropolitana di Istanbul	54
3.1.2	Linea Havalimani-Gayrettepe.....	55
3.2	Modellazione e dati di input	60
3.2.1	Obiettivi e fasi della modellazione	60
3.2.2	Inserimento dei dati di input del tracciato	60
3.2.3	Inserimento dati di input del materiale rotabile	69
3.3	Simulazioni	74
3.3.1	Verifica dei dati di input	74
3.3.2	Marcia treni e simulazioni con frequenza 5 minuti	81
3.3.3	Simulazioni con frequenza 3 minuti	87
4	MODELLAZIONE PROGETTO ESECUTIVO	92
4.1	Inserimento dati di input	92
4.1.1	Tracciato	92
4.1.2	Materiale rotabile.....	98
4.2	Simulazioni	99
4.2.1	Linea Gayrettepe – Havalimani-2.....	99
4.2.2	Linea che prosegue dopo l’aeroporto.....	109

5	ALTRE ANALISI E SIMULAZIONI.....	111
5.1	Simulazioni aggiuntive	111
5.1.1	Banalizzazione della linea	111
5.1.2	Ritardo per tempi di sosta prolungati.....	113
5.1.3	Avaria di un treno	114
5.1.4	Perdita di una sottostazione	116
5.2	Analisi metodologiche	118
5.2.1	Distanziamento minimo treni.....	118
5.2.2	Relazione tra capacità e velocità.....	121
6	CONCLUSIONI.....	125
	BIBLIOGRAFIA	127
	SITOGRAFIA	129

INDICE DELLE FIGURE

Figura 1 Tasso di urbanizzazione dal 1950 al 2050 in Turchia e nel mondo [a]	15
Figura 2 Cambiamenti delle suddivisioni modali con l'avvento dell'automobile [1].....	15
Figura 3 Tabella delle emissioni di gas serra (CO ₂) per diversi mezzi di trasporto [b]	16
Figura 4 Popolazione in Europa e nel Mondo dal 1950 al 2017 [c].....	17
Figura 5 Caratteristiche dei trasporti urbani [1].....	18
Figura 6 Capacità orarie per mezzo di trasporto [1].....	19
Figura 7 Gradi di automazione sulle linee ferroviarie [d].....	21
Figura 8 Funzioni base dei treni per diversi GoA [10]	22
Figura 9 Circuito di binario occupato [e].....	24
Figura 10 Sistema di posizionamento con boe [f].....	24
Figura 11 Posizionamento dei treni tramite antenne radio [g].....	25
Figura 12 Confronto blocco fisso e blocco mobile [h].....	26
Figura 13 Livelli di sicurezza [17].....	27
Figura 14 Crescita totale delle metropolitane automatiche UTO [3]	29
Figura 15 Crescita di metropolitane UTO nelle varie parti del mondo [3]	30
Figura 16 Caratteristiche di alcune linee metropolitane GoA 4 (parte 1)	32
Figura 17 Caratteristiche di alcune linee metropolitane GoA 4 (parte 2)	32
Figura 18 Schema di funzionamento OpenTrack [6].....	37
Figura 19 Esempio di grafo.....	38
Figura 20 Confronto tra grafo macroscopico (a) e microscopico (b) [7]	39
Figura 21 Esempio di curva di trazione	40
Figura 22 Frenatura in caso di stop (sinistra) e in caso di rallentamento (destra) [6]	41
Figura 23 Esempio di incrocio	43
Figura 24 Manovre consentite all'incrocio	43
Figura 25 Finestre di editing vertici (sinistra) e archi (destra).....	44
Figura 26 Esempio di stazione in OpenTrack [6]	45
Figura 27 Esempi di treni (in rosso si riportano i locomotori) [6]	45
Figura 28 Finestra delle proprietà dei locomotori [6]	46
Figura 29 Esempio di treno	47
Figura 30 Resistenza di pendenza [6]	49

Figura 31 Esempio di path [6].....	50
Figura 32 Schema di definizione dei percorsi.....	50
Figura 33 Esempio di tabella oraria (timetable) [6].....	51
Figura 34 Esempio di interfaccia di simulazione [6].....	52
Figura 35 Esempio di orario grafico [6].....	53
Figura 36 Esempio di diagramma spazio/velocità [6].....	53
Figura 37 Popolazione di Istanbul dal 1950 al 2030 [c].....	54
Figura 38 Sviluppo della rete metropolitana di Istanbul [j].....	55
Figura 39 Nuovo aeroporto di Istanbul [k].....	56
Figura 40 Collegamenti metropolitani al nuovo aeroporto.....	56
Figura 41 Esempio di parte del tracciato planimetrico.....	57
Figura 42 Esempio di parte del tracciato altimetrico.....	57
Figura 43 Curva di trazione.....	58
Figura 44 Curva di frenatura.....	59
Figura 45 Tracciato planimetrico L1.....	62
Figura 46 Tracciato planimetrico L2.....	63
Figura 47 Profilo altimetrico L1.....	64
Figura 48 Profilo altimetrico L2.....	65
Figura 49 Dati riguardanti le stazioni.....	66
Figura 50 Stazione di Gayrettepe modellizzata in OpenTrack.....	66
Figura 51 Progressive di scambi e tronchino (S4).....	66
Figura 52 Scambio modellato in OpenTrack.....	67
Figura 53 Esempio schema di alimentazione elettrica.....	67
Figura 54 Sottostazioni e zone alimentate.....	68
Figura 55 Tracciato progetto definitivo modellizzato su OpenTrack.....	68
Figura 56 Zone di pertinenza delle sottostazioni.....	69
Figura 57 Curva F_t -V.....	70
Figura 58 Modellazione delle forze di trazione.....	70
Figura 59 Dati "engines".....	71
Figura 60 Dati treno.....	72
Figura 61 Risultati simulazioni Yüksel Proje (t, v_{comm}).....	74
Figura 62 Diagramma v/d Yüksel Proje (L1).....	74
Figura 63 Itinerario Gayrettepe - Havalimani-1 (G-H).....	75

Figura 64 Course (corsa) e timetable (tabella oraria).....	76
Figura 65 Risultati simulazioni set 1 (t, v_{comm}).....	76
Figura 66 Diagramma v/d: set 1 (in blu), progetto definitivo (in rosso).....	76
Figura 67 Passaggio da potenza decrescente a potenza costante	78
Figura 68 Curva F/v a potenza costante	79
Figura 69 Risultati simulazioni set 2 (t, v_{comm}).....	79
Figura 70 Diagramma v/d: set 2 (in blu) progetto definitivo (in rosso).....	79
Figura 71 Risultati simulazioni set 3 (t, v_{comm}).....	80
Figura 72 Diagramma v/d: set 3 (in blu) progetto definitivo (in rosso).....	80
Figura 73 Tabelle orarie L1.....	81
Figura 74 Tabelle orarie L2.....	82
Figura 75 Caratteristiche L1 e L2	82
Figura 76 Dati relativi al giro completo.....	82
Figura 77 Grafico v/d (L1).....	83
Figura 78 Grafico v/d (L2).....	83
Figura 79 Orario grafico (treni ogni 5 minuti)	83
Figura 80 Calcolo passeggeri/treno (AW2 e AW3).....	84
Figura 81 Passeggeri per ora per direzione di marcia (treni ogni 5 min).....	84
Figura 82 Consumi trazione treno singolo (L1).....	84
Figura 83 Consumi trazione treno singolo (L2).....	85
Figura 84 Consumi elettrici SB1-SB6.....	86
Figura 85 Consumi elettrici SB7-SB12.....	86
Figura 86 Potenze elettriche media, massima e minima nelle sottostazioni	87
Figura 87 Orario grafico (treni ogni 3 minuti)	89
Figura 88 Passeggeri per ora per direzione di marcia (treni ogni 3 min).....	89
Figura 89 Consumi elettrici SB1-SB6.....	90
Figura 90 Consumi elettrici SB7-SB12.....	90
Figura 91 Potenze elettriche media, massima e minima nelle sottostazioni	91
Figura 92 Tracciato planimetrico	93
Figura 93 Tracciato altimetrico	94
Figura 94 Stazioni	95
Figura 95 Scambi	95
Figura 96 Scambio in retrostazione a Gayrettepe	96

Figura 97 Sottostazioni per l'alimentazione elettrica	96
Figura 98 Simulazione 1	97
Figura 99 Simulazione 2	97
Figura 100 Limiti di alimentazione delle sottostazioni	97
Figura 101 Modello dell'infrastruttura in OpenTrack	98
Figura 102 Percorsi dei treni in ordine cronologico.....	100
Figura 103 Tempi di percorrenza percorso 1	101
Figura 104 Velocità commerciale percorso 1	101
Figura 105 Grafico v/d percorso 1	101
Figura 106 Tabella oraria percorso 2	102
Figura 107 Velocità commerciale percorso 2	102
Figura 108 Grafico v/d percorso 2	102
Figura 109 Tabella oraria percorso 3	103
Figura 110 Velocità commerciale percorso 3	103
Figura 111 Tabella oraria percorso 4	103
Figura 112 Velocità commerciale percorso 4	103
Figura 113 Orario grafico Gayrettepe - Havalimani-2.....	104
Figura 114 Tempi di inversione e di giro e velocità medie.....	105
Figura 115 Capacità della linea.....	105
Figura 116 Zone alimentate scenario 1 (sinistra) e 2 (destra).....	106
Figura 117 Consumi sottostazioni A-D (scenario 1).....	106
Figura 118 Consumi sottostazioni E-H (scenario 1).....	107
Figura 119 Potenze minima, media e massima (scenario 1).....	107
Figura 120 Consumi sottostazioni A-D (scenario 2).....	108
Figura 121 Sottostazioni E-H (scenario 2).....	108
Figura 122 Potenze minima, media e massima (scenario 2).....	108
Figura 123 Consumi totali del sistema.....	109
Figura 124 Tabella oraria Havalimani-3 - Gayrettepe	110
Figura 125 Velocità commerciale Havalimani-3 – Gayrettepe.....	110
Figura 126 Tabella oraria Gayrettepe - Havalimani-3	110
Figura 127 Velocità commerciale Gayrettepe - Havalimani-3	110
Figura 128 Tempo giro e velocità media	110
Figura 129 Esempio di tratta analizzata per banalizzazione	111

Figura 130 Itinerari impostati.....	111
Figura 131 Misure dei tempi di passaggio con "inspectors"	112
Figura 132 Distanziamenti minimi con banalizzazione	113
Figura 133 Funzione di densità di probabilità per i tempi di sosta	113
Figura 134 Tronchino di emergenza	114
Figura 135 Aggiunta treni per avaria sulla linea	115
Figura 136 Grafico orario con durata impatti sulla linea	116
Figura 137 Guasto di una sottostazione	117
Figura 138 Potenze nella sottostazione T01 dopo il guasto nella sottostazione A.....	117
Figura 139 Finestra per il calcolo del distanziamento minimo	118
Figura 140 Distanziamenti minimi per direzione di marcia.....	119
Figura 141 Manovra di inversione di marcia a destra.....	119
Figura 142 Manovra di inversione di marcia a sinistra.....	119
Figura 143 Distanziamenti minimi con inversione in una banchina	120
Figura 144 Distanziamenti minimi con inversione in due banchine.....	120
Figura 145 Regimi di sicurezza [1].....	122
Figura 146 Curve di capacità per diversi regimi di sicurezza	123
Figura 147 Capacità massime per diversi regimi di sicurezza	124

PREFAZIONE

L'intento principale di questa tesi è di simulare il servizio di trasporto sulla nuova linea metropolitana di Istanbul, che collega il centro cittadino con il terzo aeroporto, attualmente in via di costruzione.

Il lavoro è stato svolto in collaborazione con la società d'ingegneria Geodata Engineering S.p.A., che ha fornito il supporto tecnico/metodologico e le principali informazioni concernenti la linea metropolitana oggetto di studio.

Si analizzeranno in particolare gli attuali standard nell'ambito dei trasporti ad impianto fisso, focalizzandosi poi sui trasporti metropolitani a guida automatica.

Per le modellazioni si utilizzerà OpenTrack, un software di simulazione ferroviaria sviluppato dal Politecnico Federale di Zurigo, fornito in licenza al Politecnico di Torino ed utilizzato anche da Geodata nelle simulazioni. Questo software è un potente strumento di simulazione, largamente impiegato nella progettazione e nella redazione di articoli scientifici. Si analizzeranno in particolare i suoi principi di funzionamento ed i principali output ottenibili dalle simulazioni.

Successivamente si descriverà la linea oggetto di studio, definendone le caratteristiche geometriche e operative.

Si passerà quindi all'analisi del progetto definitivo già esistente, sviluppato dallo studio di ingegneria Yüksel Proje, sul quale andranno svolte le prime simulazioni di servizio, con l'obiettivo di individuare in caso di servizio ordinario: i tempi di percorrenza, le velocità commerciali sulla linea, il numero di treni necessari, le caratteristiche del materiale rotabile impiegato nelle simulazioni ed i consumi energetici. In questa fase ci si focalizzerà inoltre sull'individuare con più precisione i principi di funzionamento del programma di simulazione OpenTrack.

Si passerà quindi all'analisi del progetto esecutivo elaborato da Geodata. Gli obiettivi saranno analoghi a quelli del progetto definitivo, ma in aggiunta si analizzeranno determinati scenari critici sulla linea, le misure per sopperire a questi scenari e gli impatti che questi avrebbero sul servizio.

In conclusione si analizzeranno quali siano gli impatti che le diverse variabili operative hanno sul servizio e come i risultati varino modificando queste variabili.

Con questo lavoro di tesi sarà quindi possibile osservare con un caso di studio concreto le metodologie di progettazione di una linea metropolitana, nell'ambito della programmazione del servizio e si osserverà che impatti avranno le diverse scelte progettuali sulla linea.

1 INTRODUZIONE

1.1 EVOLUZIONE DEI TRASPORTI

In una società sempre più urbanizzata è di fondamentale importanza che le città siano il più possibile efficienti sia dal punto di vista economico che organizzativo. In questo ambito un ruolo fondamentale lo giocano i trasporti per il collegamento tra le città e all'interno degli stessi nuclei urbanizzati.

I trasporti rappresentano infatti la “linfa vitale” delle nazioni e ne condizionano in modo importante lo sviluppo.

Durante i periodi di forte urbanizzazione si è assistito ad una crescita esponenziale della popolazione nei centri urbani. Questo sviluppo ha però negli anni evidenziato dei limiti, in quanto lo spazio nei centri abitati risulta essere limitato. A rendere possibile un'ulteriore crescita delle città furono lo sviluppo dei trasporti urbani e l'avvento nel secondo dopoguerra dell'automobile, che resero possibile raggiungere il centro cittadino con tempi di viaggio ridotti anche per le persone provenienti da zone più defilate delle città.

Saranno proprio queste zone defilate ad essere soggette ad un importante sviluppo e a contribuire alla nascita, negli anni '50 e '60, delle odierne metropoli.

Il fenomeno dell'urbanizzazione, non è però concluso, ma sta sperimentando, soprattutto in quei paesi in via di sviluppo, un'importante impennata verso l'alto.

Dei paesi in via di sviluppo fa parte anche la Turchia, nazione nella quale si trova la linea metropolitana oggetto di studio di questa tesi. La Turchia ha incrementato, dagli anni '50 ad oggi la percentuale di popolazione residente nelle città del 40%, contro il 20% della media mondiale. Questo notevole incremento è sintomo da un lato del notevole sviluppo economico della Turchia negli ultimi anni e dall'altro dell'aumento delle necessità in termini di trasporto urbano nelle città turche ed in particolare ad Istanbul.

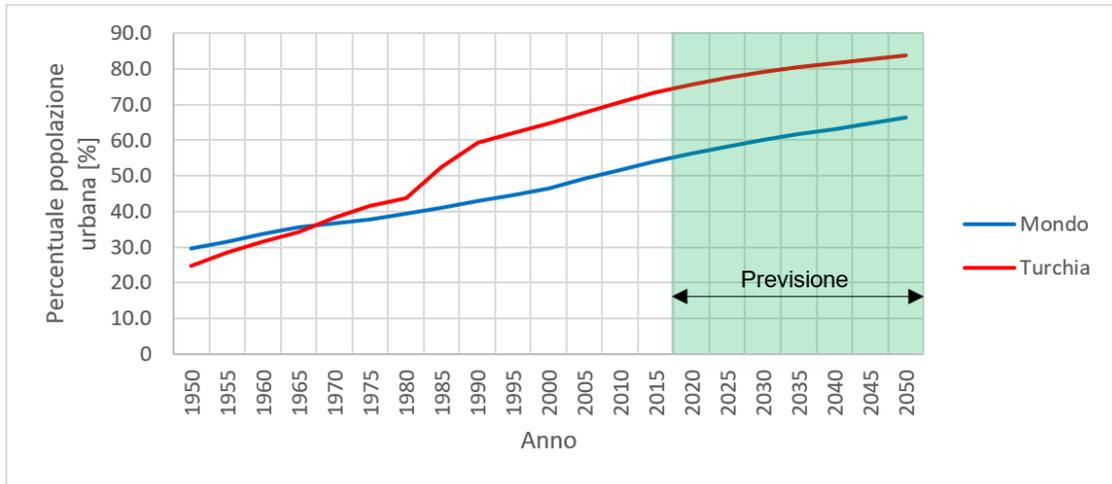


Figura 1 Tasso di urbanizzazione dal 1950 al 2050 in Turchia e nel mondo [a]

Le auto private, che hanno accompagnato lo sviluppo economico degli ultimi decenni con il fenomeno della motorizzazione di massa, hanno ormai raggiunto il loro picco di sviluppo e non sono perciò in grado di soddisfare a pieno la domanda crescente.

Come si può osservare nel seguente grafico infatti, si è giunti ad uno stato di saturazione e si ha ora una condizione di equilibrio. Gli autoveicoli privati sono ancora il mezzo di trasporto più usato, ma con margini di crescita ridotti.

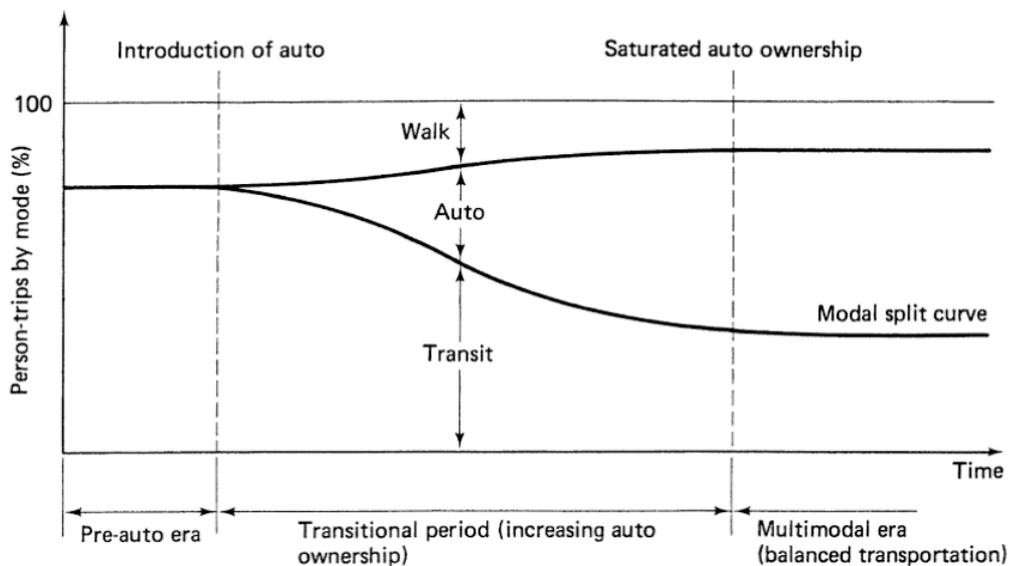


Figura 2 Cambiamenti delle suddivisioni modali con l'avvento dell'automobile [1]

Diversi sono i limiti che il trasporto privato ha evidenziato negli ultimi anni, che hanno contribuito al rallentamento nella diffusione dell'automobile come mezzo di trasporto.

Saturazione del territorio: in molte città infatti non si dispone più di altro spazio per la costruzione di nuove strade, per via dei vincoli imposti da edifici e infrastrutture esistenti.

Limitatezza delle risorse energetiche ed in particolare dei combustibili fossili: il tasso di scoperta di nuovi giacimenti è infatti notevolmente diminuito e i consumi continuano ad aumentare, in particolare nei paesi in via di sviluppo.

Sostenibilità ambientale: le emissioni di gas serra (CO_2) e di agenti inquinanti (NO_x , CO, SO_x , polveri sottili, O_3 , ...), sono notevolmente inferiori per i mezzi di trasporto pubblico ed in particolare per i treni. Nella tabella si considerano tutti i processi di inquinamento, dalla produzione di carburante/energia elettrica al moto dei veicoli (Well to Wheel).

Mezzo di trasporto	Numero medio di passeggeri	Emissioni CO_2 [$g_{CO_2}/km/passeggero$]
Treno	156	14
Autobus	12.7	68
Motoveicoli	1.2	72
Autoveicoli	1.5	104-158

Figura 3 Tabella delle emissioni di gas serra (CO_2) per diversi mezzi di trasporto [b]

Sicurezza: gli incidenti stradali sono molto più frequenti di quelli che si hanno nel trasporto ferroviario e questo comporta un notevole costo sociale, sia in termini di vite umane sia in termini di feriti. Osservando infatti i dati prodotti dal Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, riguardanti l'incidentalità dei diversi modi di trasporto in Italia, si può osservare come il trasporto stradale risulti essere di gran lunga quello meno sicuro. Su strada si sono infatti registrati tra il 2004 e il 2008 ben 27'471 decessi contro i 381 su ferrovia [2].

Congestionamento: La crescita della popolazione nei grossi centri abitati, come nel caso di Istanbul, ha portato a importanti fenomeni di congestionamento. Nei grafici seguenti si può osservare la crescita demografica importante che vi è stata negli ultimi decenni nel mondo.

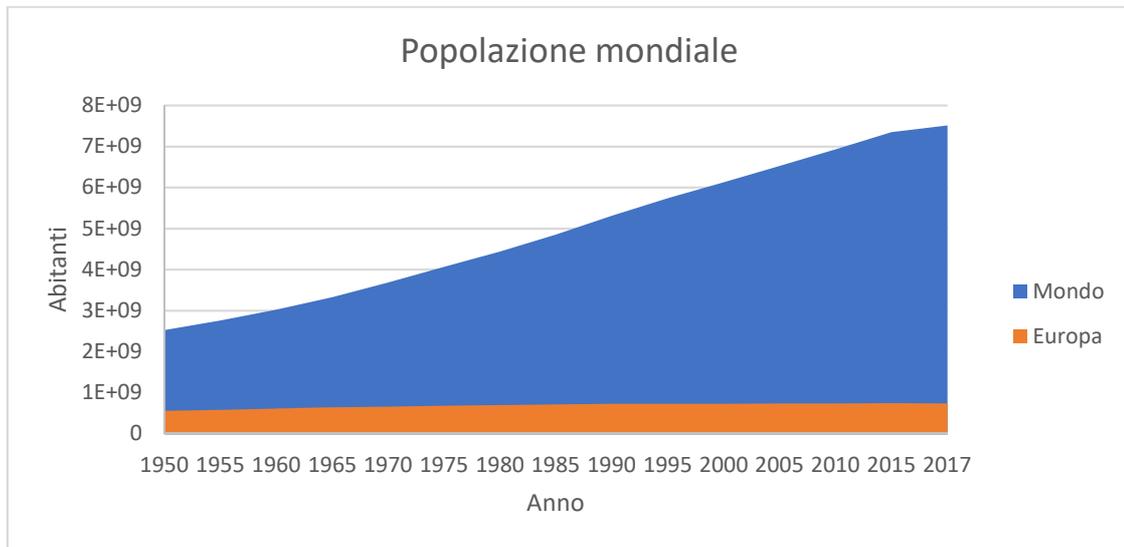


Figura 4 Popolazione in Europa e nel Mondo dal 1950 al 2017 [c]

Come si può osservare dal grafico il trend di crescita non riguarda la popolazione europea, in quanto lo sviluppo ha interessato soprattutto grandi paesi in via di sviluppo come Cina e India.

La crescita della domanda in termini di trasporti in questi paesi risulta quindi inevitabile e le autorità si sono mosse per sviluppare una rete di trasporto pubblico il più possibile efficiente, per sopperire alle attuali mancanze.

Gli organi pubblici vogliono inoltre promuovere un processo di migrazione da sistemi di locomozione a benzina/diesel a sistemi anche solo parzialmente indipendenti dal petrolio, questo perché:

- è necessario far fronte all'importante inquinamento cittadino;
- bisogna premunirsi in vista di un esaurimento dei giacimenti petroliferi, che comporterà nei prossimi anni un notevole incremento nei prezzi dei carburanti fossili.

Rimangono quindi da definire quali possano essere le tipologie di trasporto pubblico in grado di soddisfare al meglio i requisiti descritti in precedenza.

1.2 TIPOLOGIE DI TRASPORTO PUBBLICO URBANO

In questa tesi ci si focalizzerà sull'analisi dei principali mezzi di trasporto pubblico urbano e delle loro caratteristiche, mettendone in risalto in particolare i vari pro e contro.

Si possono definire tre principali categorie di trasporto pubblico urbano:

- trasporto stradale, sono inclusi tram (SCR - street car) e bus regolari (RB - regular bus), queste sono le tipologie di trasporto più lente, che permettono però di avere una distanza minore tra le stazioni;
- trasporto semi-rapido, comprendente metropolitane leggere (LRT - light rail transit) e bus rapidi (BRT - bus rapid transit), hanno capacità e velocità operative intermedie, con una distanza leggermente maggiore tra le fermate;
- trasporto rapido, comprendente metropolitane classiche (RRT - rapid rail transit) e treni regionali (RGR - regional rail), i mezzi sono più grandi e permettono quindi di trasportare molte persone a velocità più alte, per percorrere tratte anche di lunghezza elevata.

Generic Class		Private							
Characteristics	Unit	Mode		Street Transit		Semirapid Transit		Rapid Transit	
		Auto on Street	Auto on Freeway	RB	SCR	BRT	LRT	RRT	RGR
Vehicle capacity, C_v	sps/veh	4-6, total	1.2-2.0 usable	40-120	100-250	40-150	110-250	140-280	140-210
Vehicles/TU	veh/TU	1	1	1	1-3	1	1-4	1-10	1-10
TU capacity	sps/TU	4-6, total	1.2-2.0 usable	40-120	100-500	40-150	100-750	140-2400	140-2000
Max. technical speed, V	km/h	40-80	80-120	40-80	60-70	70-90	60-100	80-100	80-130
Max. frequency, ^b f_{max}	TU/h	600-800	1500-2000	60-180	60-120	60-300 ^d	40-60	20-40	10-30
Line capacity, ^e C	sps/h	720-1050 ^d	1800-2600 ^d	2400-8000	4000-15,000	4000-8000-20,000 ^d	6000-20,000	10,000-70,000	8000-60,000
Normal operating speed, V_o	km/h	20-50	60-90	15-25	12-20	20-40	20-45	25-60	40-80
Operating speed at capacity, V_o^c	km/h	10-30	20-60	8-15	8-13	15-40	15-40	24-55	38-75
Productive capacity, ^c P_o	10 ³ sp-km/h	10-25 ^e	50-120 ^e	25-90	35-150	75-200-600	120-600	700-1800	800-4000
Lane width (one-way)	m	3.00-3.65	3.65-3.75	3.00-3.65	3.00-3.35	3.65-3.75	3.40-3.60	3.70-4.30	4.00-4.75
Vehicle control ^f	—	Man./vis.	Man./vis.	Man./vis.	Man./vis.	Man./vis.	Man./vis.-sig.	Man.-auto./sig.	Man.-auto./sig.
Reliability	—	Low-med.	Low-high	Low-med	Low-med	High	High	Very high	Very high
Safety	—	Low	Low-med	Med	Med	High	High	Very high	Very high
Station spacing	m	—	—	200-500	300-500	500-800	500-1000	500-2000	1200-4500
Investment cost per pairs of lanes	10 ⁶ \$/km	1.0-8.0	20.0-100.0	0.5-6.0	5.0-10.0	5.0-40.0	10.0-50.0	40.0-100.0	50.0-120.0

^aAbbreviations: sps = spaces; veh = vehicles; TU = transit unit; RB = regular bus; SCR = streetcar; BRT = bus rapid transit; LRT = light rail transit; RRT = rail rapid transit; RGR = regional rail.

^bFor auto, lane capacity; for transit, line (station) capacity in TU/h.

^cValues for C and P_o are not necessarily products for the extreme values of their components because these seldom coincide.

^dWith multiple parallel lanes and overtaking at stations.

^eFor private auto, capacity is product of average occupancy (1.2-1.3) and f_{max} , since all spaces cannot be utilized.

^fAbbreviations are for manual, visual, signal, and automatic.

Figura 5 Caratteristiche dei trasporti urbani [1]

Come si può osservare nella tabella precedente ogni tipo di trasporto ha i suoi pregi e difetti e i suoi caratteristici ambiti di utilizzo, che dipendono principalmente dalle necessità e dalle caratteristiche specifiche delle singole città.

In particolare ad influenzare la scelta modale sono soprattutto i seguenti parametri.

Capacità: le capacità orarie aumentano per trasporti più rapidi e con veicoli più capienti.

Modo di trasporto	Capacità orarie [passeggeri/h]
Trasporto stradale	2'400 - 15'000
Trasporto semi-rapido	4'000 - 20'000
Trasporto rapido	10'000 - 60'000

Figura 6 Capacità orarie per mezzo di trasporto [1]

Vicinanza delle fermate: se le fermate sono posizionate vicine fra loro diminuisce il tempo che le persone impiegano per raggiungere la stazione, è necessario quindi individuare quale sia la distanza ottimale tra le fermate per ottenere il tempo di percorso complessivo più breve possibile (tempo partenza-stazione, tempo di viaggio e tempo stazione-destinazione). In base alle distanze tra le stazioni volute si può quindi scegliere il tipo di trasporto più adatto.

Frequenza del servizio e velocità operative: servizi più frequenti sono infatti più attrattivi per la popolazione, ma allo stesso tempo hanno velocità e capacità di trasporto minori. È quindi necessario trovare il giusto bilanciamento tra capacità del servizio e frequenza del servizio. Inoltre un servizio molto frequente comporta anche un numero di mezzi da impiegare maggiore e di conseguenza anche dei costi maggiori.

Sicurezza: i servizi di trasporto pubblico su strada sono chiaramente quelli meno sicuri, per via della condivisione parziale o totale della sede stradale con altri utenti (pedoni, biciclette e autoveicoli).

Costi: mezzi di trasporto più sicuri (a sede separata) e con capacità maggiori comportano chiaramente anche dei costi maggiori di realizzazione. Questi costi devono essere giustificati e non è sempre il caso. La scelta di una città di realizzare una metropolitana classica (e quindi con grandi capacità) può essere giustificata solo nel caso in cui si prevedano ingenti flussi di persone

che utilizzeranno quel mezzo di trasporto, andando ad attenuare eventuali fenomeni di congestionamento presenti sulla rete viaria. Nel caso di flussi di traffico ridotti, si preferisce invece optare per dei trasporti semi-rapidi, con capacità minori ma con costi anche minori di costruzione.

1.3 METROPOLITANE AUTOMATICHE

I recenti sviluppi tecnologici e l'informatizzazione che hanno caratterizzato gli ultimi anni, hanno interessato anche l'ambito trasportistico ed in particolare l'ambito dei trasporti metropolitani.

Essendo infatti le linee metropolitane a sede separata, ovvero isolate da fattori di rischio esterni, è stato possibile automatizzare parzialmente o integralmente le azioni precedentemente svolte dal macchinista. L'inaccessibilità della linea infatti, rende impossibile la presenza sul tracciato di ostacoli e non è quindi più necessaria la figura del macchinista per garantire una marcia sicura del treno.

Per metropolitane automatiche si intendono quindi quelle metropolitane nelle quali le responsabilità di parte o di tutte le operazioni svolte dal treno sono trasferite da operatori di bordo ad un sistema di controllo del treno automatico. Questo sistema di controllo del treno fa riferimento ad un centro operativo (OCC – Operation Control Center), dove vengono centralizzate le operazioni di controllo della marcia dei treni su tutta la rete.

Per via del generale accentramento delle funzioni è possibile:

- gestire con più efficacia le criticità che si verificano sulla linea attuando protocolli di emergenza prestabiliti;
- attuare operazioni di routine come l'entrata in servizio dei treni o il cambio del numero di treni da impiegare sulla linea in modo automatizzato.

Si possono identificare diversi gradi di automazione come riportato nella tabella seguente.

Grado di automazione	Tipo di operazione del treno	Prescrizioni di marcia - segnali	Stop treno	Chiusura porte	Servizio in caso di guasto
GoA 0	Guida a vista	Macchinista	Macchinista	Macchinista	Macchinista
GoA 1	ATP con macchinista	Automatico	Macchinista	Macchinista	Macchinista
GoA 2	ATP e ATO con macchinista	Automatico	Automatico	Macchinista	Macchinista
GoA 3	DTO senza macchinista	Automatico	Automatico	Operatore di treno	Operatore di treno
GoA 4	UTO senza operatori	Automatico	Automatico	Automatico	Automatico

GoA = Grado di automazione (grade of automation)
ATP = Protezione del treno automatica (automatic train protection)
ATO = Marcia automatica del treno (automatic train operation)
DTO = Servizio senza macchinista (driverless train operation)
UTO = Servizio senza personale di bordo (unattended train operation)

Figura 7 Gradi di automazione sulle linee ferroviarie [d]

Operatore di treno e macchinista si distinguono in quanto il macchinista è sempre posizionato nella cabina di testa del treno, mentre l'operatore di treno è libero di muoversi lungo il treno. Una delle responsabilità del macchinista è quella di controllare l'integrità del tracciato di fronte al treno, operazione che nel GoA 3 non può più essere svolta dall'operatore di treno in quanto quest'ultimo non è posizionato in testa al treno. Queste operazioni di controllo di integrità del tracciato devono quindi necessariamente essere automatizzate nei sistemi con GoA 3 e 4.

Nella tabella seguente si specificano con più precisione le funzioni base del servizio ferroviario e da chi queste vengono svolte.

Funzioni base del servizio ferroviario		A Vista	Non-Automatico	Semi-Automatico	Senza conducente (DTO)	Senza personale (UTO)
		GoA 0	GoA 1	GoA 2	GoA 3	GoA 4
Assicurazione di una marcia in sicurezza dei treni	Assicurare un percorso sicuro	PB (percorso dal sistema)	S	S	S	S
	Assicurare una separazione sicura tra i treni	PB	S	S	S	S
	Assicurare una velocità sicura	PB	PB (in parte dal sistema)	S	S	S
Guida del treno	Controllo di accelerazione e frenatura	PB	PB	S	S	S
Supervisione del tracciato	Prevenire la collisione con oggetti	PB	PB	PB	S	S
	Prevenire la collisione con persone sul tracciato	PB	PB	PB	S	S
Supervisione del trasferimento dei passeggeri	Controllare le porte dei passeggeri	PB	PB	PB	PB	S
	Prevenire infortuni di persone tra i veicoli o tra la banchina e il treno	PB	PB	PB	PB	S
	Assicurare delle condizioni di partenza sicure	PB	PB	PB	PB	S
Servizio del treno	Messa in servizio o fuori servizio del treno	PB	PB	PB	PB	S
	Supervisionare lo stato del treno	PB	PB	PB	PB	S
Individuazione e gestione di situazioni di emergenza	Individuare fumo/fuoco, deragliamenti del treno, perdita dell'integrità del treno, gestire di richieste dei passeggeri (chiamata/evacuazione, supervisione)	PB	PB	PB	PB	S e/o personale del centro di controllo (OCC)
PB = Personale di bordo S = Sistema automatico OCC = Operation Control Center (Centro di Controllo Operativo)						

Figura 8 Funzioni base dei treni per diversi GoA [10]

1.3.1 Sistemi automatici

I progressi tecnologici hanno reso possibile l'automazione del controllo, della guida e della supervisione della marcia dei treni tramite l'introduzione di diversi sistemi, qui di seguito descritti:

- ATP (automatic train protection), è il sistema responsabile della sicurezza nella marcia del treno, impedisce in particolare collisioni, superamento di segnali rossi e superamento dei limiti di velocità, applicando la frenatura automatica dei convogli;
- ATO (automatic train operation), è il sistema che controlla la guida dei veicoli, sostituisce tutte le funzioni del pilota ad eccezione della chiusura delle porte, che in certi casi (GoA 3) è assegnata a degli operatori a bordo del treno per motivi di sicurezza;
- ATC (automatic train control), attua automaticamente operazioni di scelta di itinerario e di regolazione dei parametri di marcia del treno, per far sì che il treno rispetti gli orari prefissati.

Il tutto fa capo ad un centro di controllo operativo (OCC – Operation Control Center), che supervisiona la marcia dei treni e attua funzioni di controllo automatico (ATS - automatic train supervision). Il sistema ATS coopera con il sistema ATC permettendo di far sì che i treni aderiscano agli orari prefissati.

1.3.2 Localizzazione dei treni e comunicazione terra-treno

Fondamentali per l'automazione del servizio sono i sistemi di posizionamento treno e di comunicazione terra-treno.

La linea viene in genere suddivisa in una serie di sezioni dette sezioni di blocco di lunghezza definita, in queste sezioni è possibile definire se è o meno presente un treno tramite diversi metodi di controllo, i principali sono qui di seguito riportati:

- conta assi, sulla linea vengono contati gli assi in entrata nella sezione di blocco. Fino a quando in uscita dalla sezione di blocco non sarà contato lo stesso numero di assi che sono entrati, la sezione di blocco verrà considerata come occupata e quindi contraddistinta da segnale di stop (rosso);
- circuito di binario, i binari formano un circuito, quando il treno entra nella sezione di blocco gli assi del treno chiudono il circuito, non circola più corrente nel relè di binario e si accende in automatico il segnale di stop (rosso).

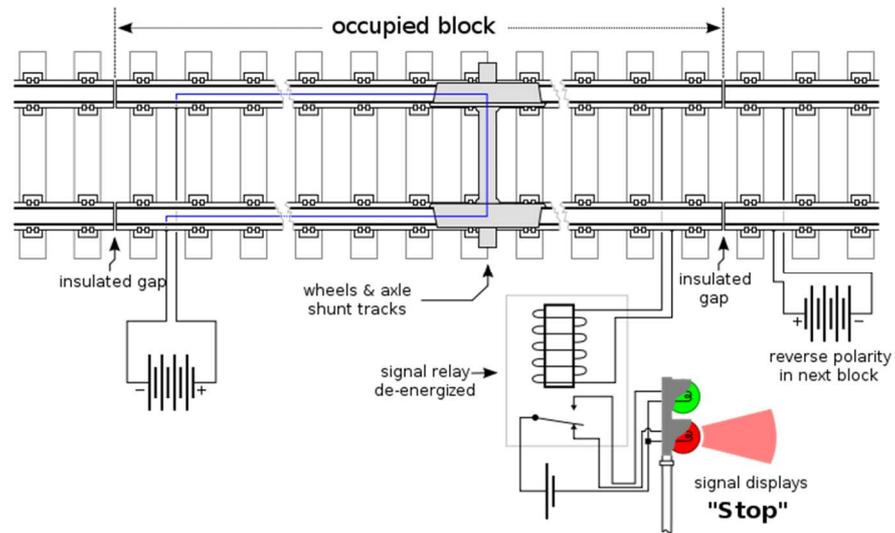


Figura 9 Circuito di binario occupato [e]

Il circuito di binario (CdB) può essere accoppiato ad un sistema a correnti codificate. Lungo il binario vengono fatte passare delle correnti codificate che permettono di scambiare informazioni tra terra e treno e trasmettere al macchinista, tramite determinati codici standard, lo stato dei segnali posti a valle rispetto alla posizione del treno;

- boe di segnalamento, sono dei dispositivi disposti tra i binari che vengono sollecitati per induzione al passaggio del treno, una volta sollecitati trasmettono i dati necessari al treno (“uplink”) e ne scaricano (“downlink”), permettendo la comunicazione tra le unità di bordo e le unità di terra;

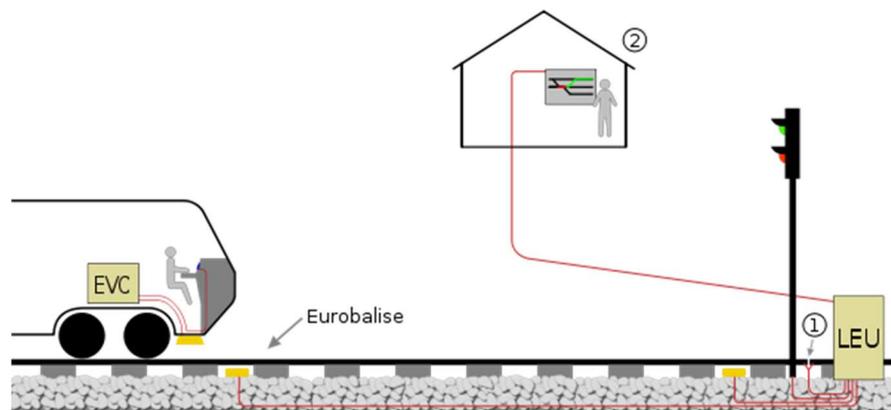


Figura 10 Sistema di posizionamento con boe [f]

- segnalamento radio o wifi, è il sistema di comunicazione e posizionamento più avanzato e consiste della trasmissione rispettivamente di segnali radio o wifi tra il treno e le stazioni

radio/wifi disposte lungo la linea. Questo permette una comunicazione tra il treno e la centrale di controllo in continuo e offre quindi la possibilità di superare il concetto di blocco fisso nel sistema di segnalamento ferroviario.

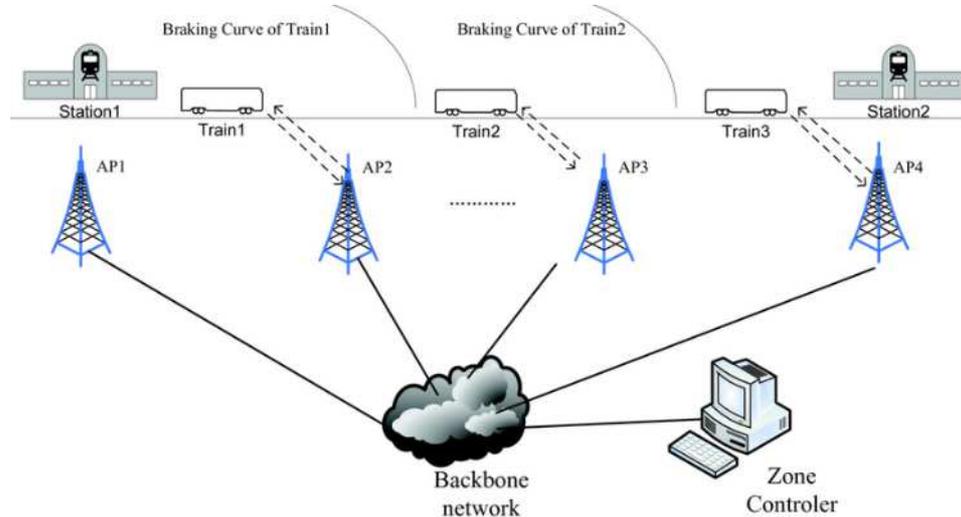


Figura 11 Posizionamento dei treni tramite antenne radio [g]

1.3.3 Blocco fisso e blocco mobile

Le logiche di blocco presenti su metropolitane automatiche possono seguire due differenti filosofie, il blocco fisso o il blocco mobile.

Entrambe fanno sì che venga mantenuto un distanziamento minimo tra i treni tale da non minacciarne la sicurezza.

Il sistema a blocco fisso consiste nella suddivisione della linea in sezioni fisse di lunghezza e posizione definite (sezioni di blocco). I sistemi di localizzazione (principalmente CdB o boe), permettono di determinare in che sezioni sono presenti i treni e queste informazioni sono inviate all'ATP, che attua le misure necessarie a impedire che due treni si trovino contemporaneamente nella stessa sezione.

Il sistema a blocco mobile è possibile solo nel caso in cui sia nota in ogni istante la posizione del treno e che questa posizione sia comunicata al centro di controllo tramite un sistema di comunicazione terra-treno in continuo, tramite un sistema di comunicazione radio/wifi.

Il distanziamento non sarà quindi più necessariamente dipendente da sezioni di blocco fisse, ma sarà possibile avvicinare tra loro i treni fino alla distanza di sicurezza minima.

Questa non dipenderà più dalla lunghezza delle sezioni di blocco, ma da distanza di frenatura, margine di sicurezza e distanza percorsa mentre avviene la comunicazione treno-terra e terra-treno.

Questa distanza di sicurezza può essere vista come una sezione di blocco, che però “segue” la posizione del primo treno e stabilisce quanto il secondo treno gli si possa avvicinare, da qui la dicitura blocco “mobile”.

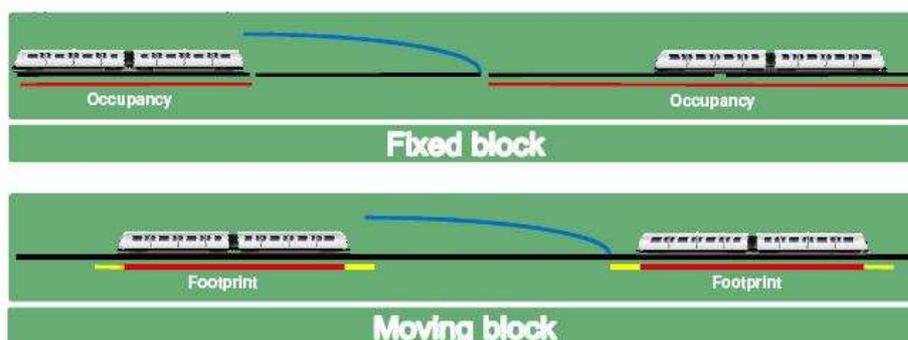


Figura 12 Confronto blocco fisso e blocco mobile [h]

I treni sono equipaggiati con odometri, che misurano la distanza percorsa conoscendo il numero di giri e la circonferenza delle ruote, in ridondanza al sistema di posizionamento via radio/wifi. La distanza misurata è chiaramente soggetta ad errori, che sono dovuti a variazioni nella dimensione delle ruote. Questo problema si verifica in particolar modo in veicoli su gomma, caratterizzati da ruote più deformabili.

Gli errori di posizionamento dei treni si propagano con l'avanzare del treno e, per far sì che questo errore non comprometta la sicurezza del servizio, l'odometro viene abbinato ad un sistema a boe le cui coordinate lineari lungo l'infrastruttura sono note e fisse. Quando il treno transita su queste boe è possibile eliminare l'errore di misura correggendo quindi il posizionamento. Tante più saranno le boe disposte sulla linea, tanto più l'errore di misura sarà ridotto. In base alla precisione richiesta sarà quindi possibile determinare la quantità di boe necessaria e la loro relativa posizione sul tracciato.

Per poter utilizzare un blocco mobile lungo una linea sono necessarie due condizioni fondamentali:

- che vi sia una localizzazione in ogni istante dei treni lungo la linea, indicante la posizione esatta dei treni;

- che vi sia una comunicazione in continuo tra terra e treno.

Il vantaggio nell'utilizzo del blocco mobile consiste proprio nella possibilità di avvicinare maggiormente i treni tra loro e di ottenere quindi una frequenza del servizio maggiore, con un conseguente incremento nella capacità della linea.

1.3.4 Sicurezza

Per definire la sicurezza di un dato sistema ferroviario si utilizza un approccio probabilistico, dove si stabilisce un livello di rischio accettabile.

Si definiscono diverse classi di sicurezza denominate SIL (Safety Integrity Level) indicanti la probabilità che si verifichi un dato guasto di un sistema o di una funzione rilevante per la sicurezza nel servizio.

Le classi sono specificate nella tabella seguente.

Frequenza di guasti pericolosi all'ora	Frequenza di guasti tollerabili all'ora per ogni funzione di sicurezza (THR – Tolerable Hazard Rate)	SIL
$< 10^{-10}$	$10^{-9} \leq \text{THR} < 10^{-8}$	4
$10^{-10} - 0.3 \cdot 10^{-8}$	$10^{-8} \leq \text{THR} < 10^{-7}$	3
$0.3 \cdot 10^{-8} - 10^{-7}$	$10^{-7} \leq \text{THR} < 10^{-6}$	2
$10^{-7} - 0.3 \cdot 10^{-5}$	$10^{-6} \leq \text{THR} < 10^{-5}$	1

Figura 13 Livelli di sicurezza [17]

Le misure attuate per garantire la sicurezza sono volte ad ottenere un livello di rischio il più basso possibile, tenendo conto dei costi e ponderando i vantaggi che ogni sistema comporta. Si attua quindi un'analisi costi/benefici con l'obiettivo di massimizzare la sicurezza complessiva sulla linea.

I vari sistemi di automazione hanno permesso negli ultimi anni di migliorare i livelli di sicurezza delle linee ferroviarie in maniera importante e di raggiungere, per determinate operazioni ad alto rischio come la marcia del treno sulla linea, un ottimo livello di sicurezza (SIL 4).

1.3.5 Pro e contro di metropolitane automatiche (GoA 4)

Le metropolitane ad automazione integrale permettono di ottimizzare al massimo i tempi di percorrenza dei treni e di viaggiare sempre (eccezion fatta per i transitori di accelerazione e frenatura) al limite delle velocità imposte dal tracciato, riducendo quindi le inefficienze dovute a una guida più “irregolare” da parte dei macchinisti.

Gli intervalli tra i passaggi di due treni che si susseguono si possono inoltre abbassare fino ad un minimo di circa 75 secondi, e le soste in stazione ad un minimo di 15 secondi.

Il servizio risulta più flessibile e adattabile alle esigenze variabili dell’utenza e può essere potenziato più facilmente in caso di grandi eventi.

L’inaccessibilità della linea permette inoltre di utilizzare, al posto di un sistema di alimentazione con catenaria, un sistema di alimentazione con terzo binario, che risulta più compatto e occupa meno spazio.

Si ha quindi una sezione di scavo ridotta, che può essere realizzata più vicina alla superficie per via della riduzione delle sollecitazioni, con una conseguente ridotta profondità delle stazioni. Gli scavi delle stazioni sono realizzati a cielo aperto e una minore profondità permette quindi di ottenere un notevole risparmio nei costi di costruzione.

Un altro aspetto che permette di risparmiare spazio è la lunghezza ridotta dei treni, resa possibile da un distanziamento minimo minore. Si può mantenere infatti costante la capacità della linea utilizzando un servizio più frequente e con treni di dimensione ridotta.

A treni più corti corrispondono stazioni più corte e di conseguenza costi di costruzione minori.

L’automazione dei mezzi permette inoltre di migliorare significativamente anche la sicurezza. I treni che utilizzano un sistema UTO godono infatti di una migliore affidabilità, fino ad oggi infatti si è verificato un solo incidente in questo tipo di linee, ad Osaka alla fine degli anni ’80.

Grazie alla guida controllata, ai tempi di sosta ridotti e alla maggiore sicurezza, viene percepito dai passeggeri un miglioramento significativo nella qualità del servizio.

Dal punto di vista dei costi, a parità di costi di scavo, la costruzione di una linea con UTO risulta complessivamente più onerosa di una tradizionale.

Da un lato infatti si può risparmiare sul numero di convogli di riserva distribuiti sulla linea, grazie ad una maggiore efficienza nella gestione dei mezzi.

Dall'altro però questi risparmi sono controbilanciati da maggiori costi dovuti al sistema di segnalamento e di controllo (CBTC – communication based train control), ma soprattutto dal sistema di protezione del tracciato.

Per quanto riguarda i costi operazionali, invece, il discorso si inverte e i costi risultano significativamente minori per i treni automatici.

Questo risparmio è dovuto principalmente all'abolizione della figura del conducente e alla possibilità di risparmiare maggiormente energia (fino al 30% [1]), "aggiustando" le curve di accelerazione e frenatura. I costi di manutenzione sono invece leggermente maggiori, per l'introduzione dei sistemi di protezione del tracciato (la manodopera specializzata per la manutenzione in sistemi di ATC riceve infatti uno stipendio maggiore di circa il 20%). Il bilancio complessivo rimane comunque positivo e si aggira intorno a valori compresi tra il 3% e il 6% all'anno [11].

1.3.6 Metropolitane automatiche nel mondo

Nel mondo circa un quarto delle reti metropolitane ha almeno una linea con UTO.

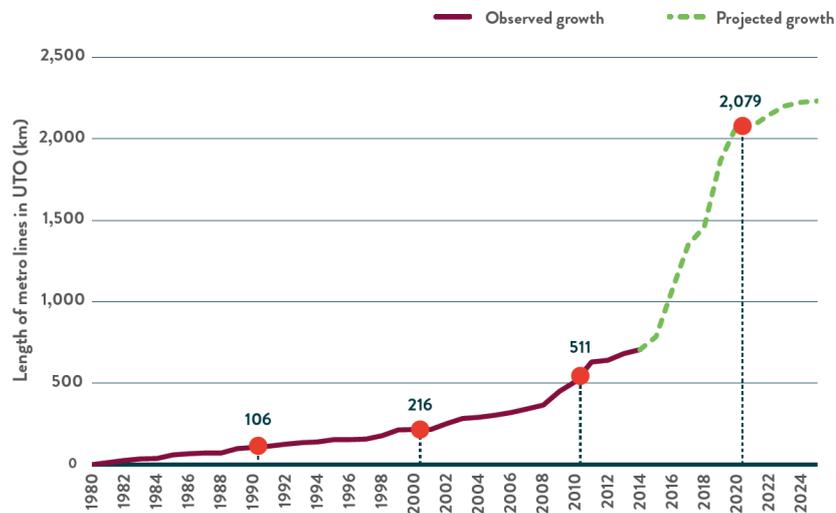


Figura 14 Crescita totale delle metropolitane automatiche UTO [3]

In totale i chilometri di linee metropolitane automatiche ammontano attualmente a circa 1'000 km e aumentano di anno in anno. Ci si aspetta infatti nel 2025 di raggiungere i 2'200 km di linea. Le crescite maggiori si avranno in Asia, Europa e nei paesi del MENA (medio oriente e nord Africa), dove i chilometri di linea aumenteranno considerevolmente.

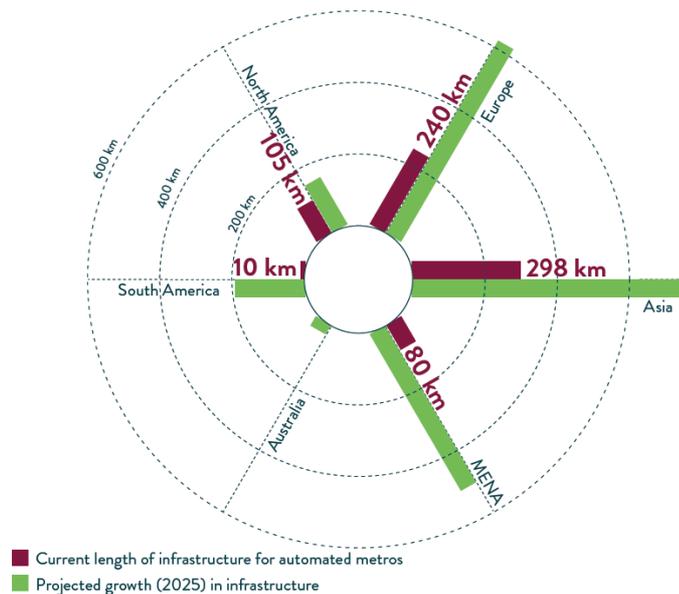


Figura 15 Crescita di metropolitane UTO nelle varie parti del mondo [3]

1.3.7 Caratteristiche principali delle linee esistenti

Le linee metropolitane automatiche esistenti hanno caratteristiche variabili. La maggior parte di esse ha una capacità dei treni intermedia, con una capienza massima compresa tra 300 e 700 passeggeri (55.7%).

Per quanto riguarda il controllo del materiale rotabile il 68% usa il CBTC (Communication Based Train Control), sistema di controllo del traffico ferroviario basato sulla comunicazione in continuo tra terra e treno.

La protezione delle stazioni avviene nel 15% dei casi tramite sistemi di rilevamento intrusioni e nel restante 85% delle linee con porte di banchina che impediscono a persone e oggetti di cadere sul tracciato.

Per quanto riguarda la tipologia di infrastruttura questa risulta essere sempre a sede separata, in particolare su viadotti nel 38% dei casi e sottoterra nel 62%.

Nella pagina seguente si riportano degli esempi di metropolitane automatiche con grado di automazione 4 e le loro principali caratteristiche.

Si può osservare come in genere le velocità massime delle linee non superino quasi mai gli 80 km/h, per via soprattutto della distanza ridotta tra le stazioni, che non permetterebbe di sfruttare

pienamente velocità massime di linea maggiori. I treni hanno in genere lunghezze inferiori a 100 metri e di conseguenza anche capacità ridotte (<1000 passeggeri per treno).

I sistemi di elettrificazione sono piuttosto variabili tra elettrificazione con terzo binario e linee aeree di contatto.

Molte delle nuove linee in via di costruzione utilizzano inoltre la nuova logica del blocco mobile, che permette di ridurre gli intervalli di passaggio tra i treni ad un minimo di circa 60/70 secondi.

City	Type of vehicle	Operation start	Line	Lines length [km]	N° stations	Infrastructure	Max v [km/h]	Service v [km/h]
Copenhagen	AnsaldoSTS/AnsaldoBreda Driverless Metro	2002	M1/M2	21.5	22	Double tunnel	80	40
		2018	M3/M4	17	17	Double tunnel	80	39
Brescia	AnsaldoSTS/AnsaldoBreda Driverless Metro	2013	-	13.7	17	Single tunnel/Viaduct	80	40
Milano	AnsaldoSTS/AnsaldoBreda Driverless Metro	2022	M4	15.2	21	Double tunnel	80	30
		2013	M5	13.1	19	Single tunnel	80	30
Roma	AnsaldoSTS/AnsaldoBreda Driverless Metro	2014	C	25 (+17)	30 (+12)	Double tunnel	90	35
Torino	VAL 208	2006	1	13.2 (+1.9)	21 (+2)	Single tunnel	80	33
Lille	VAL 206/208	1983-89	1/2	45	60	Single tunnel/Viaduct	80	34
Rennes	VAL 208	2002	A	9.4	15	Single tunnel/Viaduct	80	32
Paris	Siemens Trainguard MT CBTC	1998	14	9.2	9	Single tunnel	80	40
Bacelona	Siemens Trainguard MT CBTC	2010	9/10	47.8	52	Single tunnel	80	33
Lousanne	Alstom Urbalis	2008	M2	5.9	14	Single tunnel/Viaduct	60	20
Lima	AnsaldoBreda/Alstom	1990 (2011)	L1	34.6	26	Viaduct	80	40
Budapest	Alstom	2014	M4	7.34	10	Double tunnel	80	30
Sao Paulo	Hyunday Rotem	2010	L4	12.8	11	Single tunnel	80	40
Kuala Lumpur	Innovia Metro 200 (Bombardier ART)	1998	5	46.4	37	Double tunnel/Viaduct	80	-
Kuala Lumpur	Siemens/CSR Nanjing Puzhen	2016 (2017)	9	51	31 (+3)	Tunnel/Viaduct		
Hong Kong	MTR SP1900/1950 EMU	2007	West Rail Line	35.7	12	Double tunnel/Viaduct	130	56
Singapore	Alstom Metropolis C751A/C	2006	NEL 6/7	19.2	16	Double tunnel	90	35
Dubai	KinkiSharyo Dubai Metro	2009	Red/Green	74.6	49	Single tunnel/Viaduct	95	38-47

Figura 16 Caratteristiche di alcune linee metropolitane GoA 4 (parte 1)

City	Signaling system	Min headway [s]	Maximum capacity [pphd]	Electrification [V]	N° trains	Train length [m]	Weight [t]	Power [kW]	Train capacity
Copenhagen	Fixed block	90"	12000 (4p/m2)	750DC third rail	34 (3 cars)	39	52	630	300 (96 seated)
	Moving block	100"	11000 (4p/m2)	750DC third rail	28 (3 cars)	39	52	630	300 (96 seated)
Brescia	-	90"	17000 (6p/m2)	750DC third rail	18 (3 cars)	39	52	630	425 (74 seated)
Milano	Moving block	90"	24000 (6p/m2)	750DC third rail	47 (4 cars)	51	-	-	600
	Fixed block	75"	26000 (6p/m2)	750DC third rail	21 (4 cars)	48	-	-	536 (72 seated)
Roma	-	120"	36000 (6p/m2)	1500DC overhead	30 (+13) (6 cars)	108	-	-	1200 (200 seated)
Torino	Fixed block	69"	23000	750DC third rail	25 (2 cars)	52	31	1040	440 (76 seated)
Lille	-	60"	19000 (6p/m2)	750DC third rail	120 (2 cars)	52	28	604	312
Rennes	-	80"	15000	750DC third rail	30 (2 cars)	52	28	604	340
Paris	-	85"	30000	750DC third rail	(6 cars)	90	135	2800	720
Bacelona	-	240"	10500	1500DC overhead	22 (8 cars)	86	157	2489	700 (112 seated)
Lousanne	-	180"	8120	750DC third rail	15 (2 cars)	30	57	-	406
Lima	-	360"	-	1500DC overhead	42 (6cars) 19 (5cars)	107	-	2489	-
Budapest	-	90"	20000	750DC third rail	15	80	27,14 34,5	-	-
Sao Paulo	-	85"	70000	1500DC overhead	86 (6cars)	128	-	-	1746 (306 seated)
Kuala Lumpur	Moving block	-	-	600DC third rail	210 (2-4 cars)	33.7-67.1	43-86	-	260-520 (115-230 seated)
Kuala Lumpur	Moving block	210"	20000	750DC third rail	58 (4 cars)	76	80.4	-	1200
Hong Kong	Moving block	171"	64000 (7p/m2)	25000AC overhead	29 (7-8 cars)	173.7-198.6	-	-	2366-2704
Singapore	Moving block	120"	57600 (6p/m2)	1500DC overhead	43 (6 cars)	141.9	-	2400	1920 (298 seated)
Dubai	Moving block	90"	25720	750DC third rail	79 (5 cars)	51.9	170.5	550	643 (136 seated)

Figura 17 Caratteristiche di alcune linee metropolitane GoA 4 (parte 2)

1.4 LETTERATURA IN MATERIA

Definite le basi di funzionamento e le caratteristiche delle principali metropolitane automatiche esistenti, risulta ora utile comprendere più a fondo le differenze tra l'utilizzazione di sistemi automatici e sistemi manuali.

A tal proposito numerosi studi sono stati svolti in passato, per definire le potenzialità ed i limiti di un servizio di tipo automatico. Di particolare interesse sono gli studi condotti da Milroy [13] e Powell [14] dove si analizzano i vantaggi e gli svantaggi rispettivamente nella costruzione di nuove metropolitane automatiche o nella conversione da manuali ad automatiche di linee metropolitane esistenti.

Questi studi sono utili per definire quando è consigliabile la costruzione di una metropolitana automatica e quando invece questo tipo di trasporto presenta dei limiti, per poter permettere alle autorità pubbliche di effettuare una scelta ottimale per il potenziamento dei trasporti e quindi ottimizzare gli investimenti, soprattutto dal punto di vista economico e della qualità del servizio.

1.4.1 Benefici dell'automazione

Ad ogni grado di automazione corrisponde in particolare una serie di benefici sul servizio di trasporto.

I benefici che sono validi per un GoA 2 sono chiaramente validi anche per un GoA 3/4 e riguardano principalmente la possibilità di controllare le curve di velocità dei veicoli e la possibilità di attuare strategie di controllo del traffico in modo diretto. Altri benefici sono inoltre l'aumento nella frequenza dei treni e il miglior recupero dei ritardi, che portano ad avere delle capacità di linea maggiori.

Le automazioni delle attività di routine, che implicano un alto livello di stress del macchinista, portano ad un incremento della sicurezza del sistema e riducono la possibilità di errori umani.

Grazie ad un controllo delle curve di velocità è possibile inoltre definire un sistema di risparmio energetico, che prenda anche in considerazione i ritardi dei treni. Si possono infatti introdurre delle regole che definiscono la possibilità di attuare manovre di marcia inerziale quando il treno non è in ritardo rispetto agli orari di servizio.

Un migliore controllo delle accelerazioni inoltre, permette di ottenere una guida più confortevole e di salvaguardare l'usura dei set di ruote e dei sistemi di trazione e di frenatura.

Con l'introduzione dei sistemi con GoA 3 i cambiamenti rispetto al GoA 2 sono dovuti all'abolizione della figura del macchinista, rimpiazzato da un operatore di treno.

La presenza di un operatore di treno che non è in cabina bensì nei veicoli, aumenta la percezione di sicurezza dei passeggeri, che possono fare riferimento alla figura dell'operatore per chiedere assistenza. Lo spazio precedentemente occupato dalla cabina può inoltre essere adibito ad ospitare i passeggeri, con un conseguente incremento della capacità dei veicoli.

Nei sistemi con GoA 4 non sono presenti membri dello staff a bordo. Questo riduce chiaramente le spese per il personale e aumenta la flessibilità degli orari, in quanto i costi marginali dovuti all'utilizzo di treni aggiuntivi risultano significativamente ridotti.

L'assenza di personale rende inoltre il servizio più resiliente a possibili scioperi indetti dai sindacati. In treni con staff a bordo infatti, uno sciopero del personale può avere un impatto significativo sull'esercizio, che può portare allo stop di parte o di tutte le corse, peggiorando la percezione degli utenti riguardo l'affidabilità del servizio.

I bassi costi marginali per l'utilizzo di un maggior numero di treni possono inoltre portare ad un utilizzo di treni di dimensioni ridotte e con una frequenza minore (mantenendo costante la capacità della linea). Un numero maggiore di treni comporta una maggiore flessibilità del servizio, è possibile infatti adattare al meglio il numero di veicoli utilizzati alle variazioni della domanda. Tutti questi aspetti aumentano l'attrattività del servizio, incrementando il numero di passeggeri che utilizzano questo tipo di trasporto in maniera considerevole.

Le differenze nell'utilizzazione di un sistema GoA 4 si possono notare in modo più marcato in reti di dimensioni ridotte e con flussi di passeggeri modesti.

1.4.2 Ostacoli dell'automazione

Gli ostacoli che si contrappongono all'implementazione di linee automatiche sono differenti e di diversa entità a seconda che si stia considerando la costruzione di una nuova linea o che si debba convertire una linea esistente. I principali ostacoli riguardano soprattutto l'infrastruttura e le attitudini dell'opinione pubblica e del personale.

Per quanto riguarda l'infrastruttura chiaramente, come riportato anche nei capitoli precedenti, i costi nell'introduzione di sistemi ATP e ATO sono rilevanti per via del maggior grado di complessità sia dei veicoli sia dei sistemi di segnalamento. Questi costi in particolare risultano

maggiori nel caso di conversione di una linea da manuale ad automatica, in quanto è necessario sostituire tutto il materiale rotabile e adattare il relativo sistema di segnalamento. Una spesa di questo tipo risulta invece più facilmente giustificabile nel caso in cui sia già necessaria una sostituzione dei veicoli e del sistema di segnalamento o nel caso in cui si stia costruendo una nuova linea da zero.

Ostacoli specifici caratteristici della migrazione ad un sistema automatico sono:

- la necessità di chiudere temporaneamente la linea per i lavori, situazione che risulta essere poco praticabile e che comporta un importante impatto economico;
- adattare la linea dal punto di vista della separazione del tracciato, alcune linee metropolitane classiche hanno infatti attraversamenti a livello per mezzi o persone ed è quindi necessario che questi passaggi vengano spostati su appositi ponti o sottopassaggi;
- la necessità di introdurre delle porte di banchina per evitare che persone o cose finiscano volontariamente o non sul tracciato, inficiandone la sicurezza del servizio. Dei sistemi anti-intrusione possono infatti solo in parte mitigare il rischio di incidenti in quanto i passeggeri possono cadere (o saltare in caso di suicidi) di fronte al treno quando questo è troppo vicino per potersi fermare in tempo;
- migliorare i sistemi di comunicazione e di monitoraggio per sostituire le funzioni dello staff.

Altri ostacoli importanti alla diffusione delle metropolitane automatiche sono l'opinione dei passeggeri e l'opposizione del personale.

Alcuni passeggeri possono infatti sentirsi meno sicuri a viaggiare su delle metropolitane automatiche, per via dell'assenza di una diretta supervisione umana. Tuttavia la rimozione del personale di bordo e l'introduzione delle misure di sicurezza porta nella realtà ad un notevole incremento della sicurezza. Si prevede quindi che sempre meno passeggeri si opporranno allo sviluppo delle metropolitane automatiche, che saranno quindi percepite più positivamente e saranno accettate dagli utenti.

Un aspetto importante riguarda invece la probabile opposizione del personale di bordo dei treni, che vedendo a rischio la propria posizione di lavoro, potrebbe far capo alle associazioni sindacali e portare a disservizi sulla rete metropolitana. Un punto di contatto con i sindacati è tuttavia raggiungibile, come dimostra il caso della conversione della linea 1 della metropolitana di Parigi, il personale può infatti venire reindirizzato in altre linee o coprire nuovi ruoli.

In conclusione la decisione di utilizzare un sistema automatico su una nuova linea o su linee esistenti deve sottostare ad un'attenta analisi di costi e benefici. Se da una parte infatti l'automazione comporta un maggiore investimento di capitale, dall'altra è possibile ottenere un notevole incremento della qualità e della capacità del servizio. Questo equilibrio può chiaramente cambiare in futuro, in quanto i sistemi di automazione si stanno notevolmente sviluppando negli ultimi anni. Una diffusione su larga scala di sistemi automatici può portare infatti ad una riduzione nei costi dell'automazione.

2 MODELLAZIONE

Per stimare i tempi di percorrenza, le capacità, le performance, i consumi energetici e altri aspetti basilari che caratterizzano una linea metropolitana, è necessario fare capo a dei modelli di simulazione.

Esistono diversi programmi informatici per la simulazione del servizio ferroviario, in questa tesi si utilizzerà il programma OpenTrack, sviluppato dal Politecnico Federale di Zurigo.

Si analizzerà in particolare il suo funzionamento e si osserverà quali sono i principali dati di input e di output del programma.

2.1 PRINCIPI DI MODELLAZIONE

In un programma di simulazione del servizio ferroviario, come mostrato in figura, è necessario fornire dei determinati dati di input riguardanti: il materiale rotabile, l'infrastruttura e gli itinerari da percorrere su questa infrastruttura, nonché gli orari di servizio.

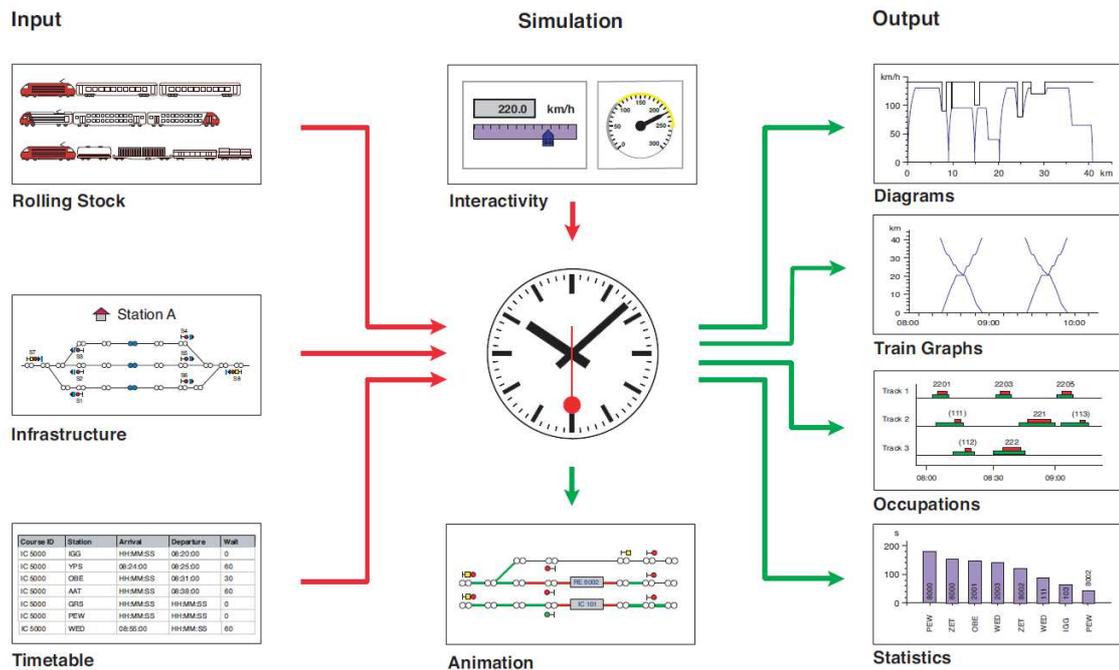


Figura 18 Schema di funzionamento OpenTrack [6]

Con questi dati di input il programma svolge la simulazione secondo determinati parametri definiti a priori e fornisce gli output richiesti, che possono essere personalizzati a seconda delle necessità del progettista.

Nella simulazione quindi, i treni vengono fatti muovere lungo l'infrastruttura secondo i percorsi preimpostati. Il moto dei treni viene calcolato tramite l'integrazione numerica delle equazioni differenziali del moto (in maniera continua), mentre lo stato dei segnali viene calcolato in modo discreto, a seconda dello stato di occupazione o meno delle sezioni di blocco.

Lo stato dei segnali influisce a sua volta, in caso di aspetto restrittivo, sul moto dei convogli.

2.1.1 Infrastruttura

L'infrastruttura viene modellizzata secondo una serie di nodi e archi. Le caratteristiche di questi elementi possono essere definite singolarmente.

Ogni nodo sull'infrastruttura rappresenta un punto di discontinuità.

Punti di discontinuità possono essere determinati da:

- differenze nelle caratteristiche geometriche di tracciato (pendenze, curve, tunnel, stazioni, segnali, limiti di velocità, ecc. ...);
- intersezioni tra più di due archi.

L'infrastruttura viene quindi rappresentata tramite un grafo.

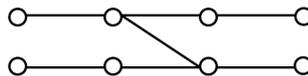


Figura 19 Esempio di grafo

Esistono diversi livelli di dettaglio nella creazione del grafo:

- microscopico, nel quale si inseriscono nel modello il maggior numero possibile di nodi, con l'obiettivo di ottenere dei risultati il più possibile precisi;
- macroscopico, i nodi del modello microscopico vengono aggregati per avere una visione più generale dell'infrastruttura e del suo funzionamento;
- mesoscopico, è una via di mezzo tra il modello microscopico e macroscopico.

Si riporta un confronto tra una modellazione di tipo microscopico (a) e una modellazione di tipo macroscopico (b).

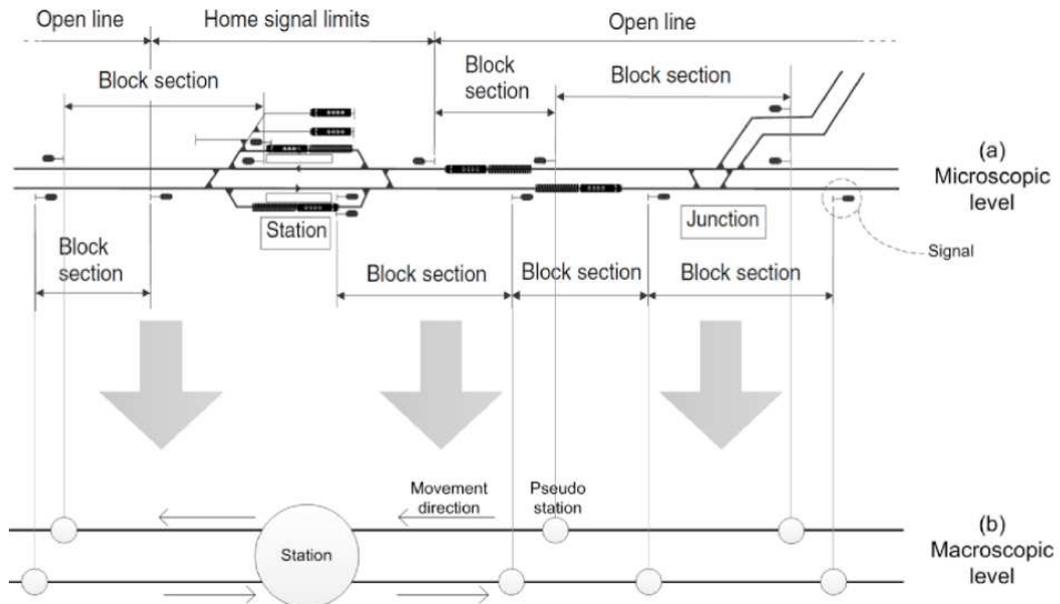


Figura 20 Confronto tra grafo macroscopico (a) e microscopico (b) [7]

In generale modelli di tipo macroscopico sono preferiti per applicazioni di carattere più generale come la gestione dell'infrastruttura, in quanto permettono una visualizzazione più rapida ed intuitiva.

Modelli di tipo microscopico sono invece fondamentali per il calcolo dei tempi di percorrenza, la redazione di orari grafici e in generale simulazioni di precisione del servizio ferroviario.

2.1.2 Materiale rotabile

Il materiale rotabile viene caricato sui programmi di simulazione fornendo i dati riguardanti il peso, la rispettiva componente aderente, la lunghezza, la curva di trazione e il tipo di alimentazione elettrica utilizzata.

È quindi possibile rappresentare la curva dello sforzo di trazione come nella figura seguente.

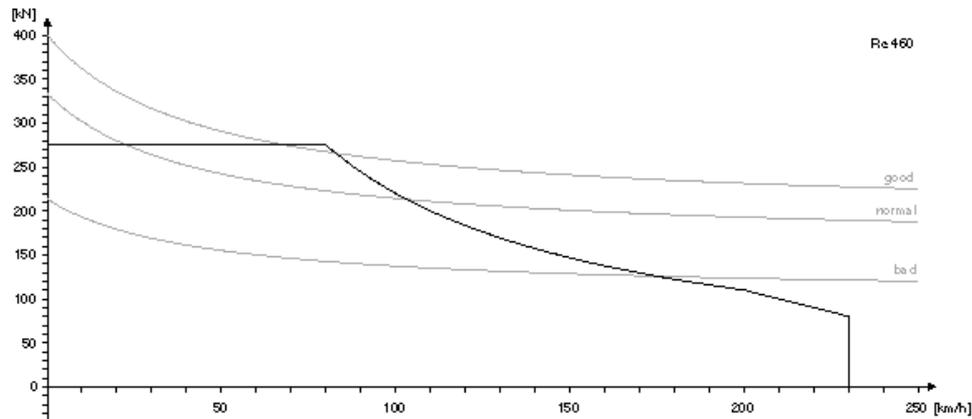


Figura 21 Esempio di curva di trazione

Altri parametri da definire per il materiale rotabile sono le caratteristiche di frenatura del mezzo e le formule da utilizzare per il calcolo delle resistenze, che variano in modo importante a seconda della tipologia di veicoli.

2.1.3 Orari

Una volta definiti infrastruttura e materiale rotabile è necessario stabilire tramite orari e itinerari dove e quando far viaggiare i treni sul tracciato.

Questo è possibile definendo dei set di percorsi che i treni dovranno seguire lungo l'infrastruttura. Si imposterà per ogni treno che percorso seguire e si definiranno quindi in delle tabelle gli orari di partenza e di arrivo nelle varie stazioni.

2.1.4 Simulazione

Una volta impostati tutti i parametri si può lanciare la simulazione.

Il programma calcola i profili di marcia dei treni, tenendo conto delle caratteristiche dell'infrastruttura e dei veicoli.

I treni accelerano fino al raggiungimento della velocità massima definita per quel veicolo.

Se sull'infrastruttura è impostato un limite di velocità, questo valore non può essere superato, quindi il treno accelererà fino alla velocità limite. Se sul tracciato è stata imposta una diminuzione

della velocità limite o uno stop il treno deve rallentare dalla distanza di rallentamento o di stop corrispondente (P1), seguendo le curve di frenatura determinate dalla capacità frenante del treno stesso.

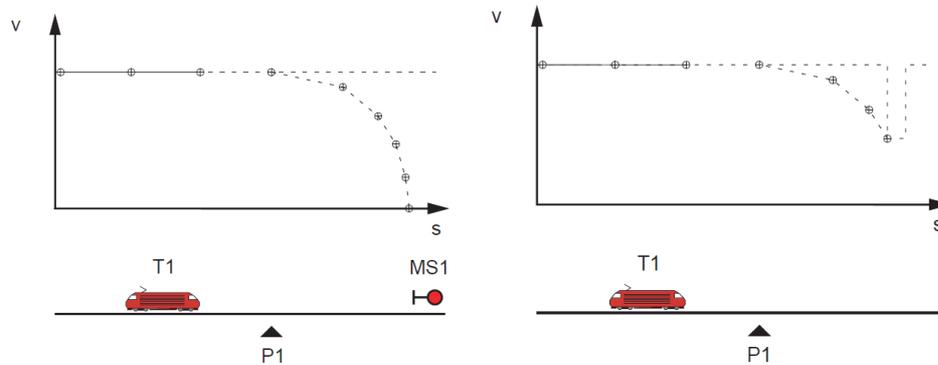


Figura 22 Frenatura in caso di stop (sinistra) e in caso di rallentamento (destra) [6]

I profili di accelerazione e di frenatura del treno sono calcolati tramite risoluzione delle rispettive equazioni differenziali del moto.

Di seguito viene riportata la formula generale, il valore di F in particolare è positivo in accelerazione nullo in caso di marcia inerziale e negativo in caso di frenatura.

$$F - R = m \cdot a$$

F = forza di trazione (+) / frenatura (-)

R = resistenza al moto

m = massa equivalente

a = accelerazione

Il programma calcola quindi i profili di spazio, velocità e accelerazione dei treni lungo i percorsi predefiniti e fornisce gli output necessari al progettista, che possono variare a seconda del software impiegato.

2.1.5 Altre funzioni

Nelle simulazioni è possibile impostare manovre di marcia inerziale in determinate tratte della linea (prima di rallentamenti o stop). Chiaramente questo tipo di manovre diminuisce in parte le prestazioni della linea, ma permette di stimare quale possa essere il potenziale risparmio energetico, che risulta in certi casi anche considerevolmente elevato.

Un altro aspetto che si può trattare nelle simulazioni è quello dei ritardi. Impostando delle distribuzioni di ritardo casuale nei tempi di fermata alle stazioni è possibile simulare quanto il nostro orario sia stabile in presenza di variazioni dagli orari originali. Il concetto di stabilità è associato infatti all'abilità del sistema ferroviario di recuperare ritardi. Si possono distinguere in particolare due diversi tipi di stabilità, la stabilità locale e la stabilità globale. Un'area del sistema si dice localmente stabile se i ritardi in uscita da quell'area sono minori di quelli in entrata, mentre un sistema chiuso si dice globalmente stabile se i ritardi vengono recuperati in un tempo finito.

2.2 FUNZIONAMENTO DI OPENTRACK

Le logiche utilizzate nel programma di simulazione del servizio ferroviario OpenTrack sono analoghe a quelle finora descritte.

È un programma di simulazione microscopico, infatti tutti gli elementi vengono introdotti nel modello senza semplificazioni.

Utilizza un sistema di simulazione misto dove il moto dei treni è modellizzato in continuo, mentre i segnali sono modellizzati a tempo discreto (tranne per sistemi a blocco mobile).

Nelle simulazioni tutte le potenzialità del sistema vengono sfruttate al massimo e si ottiene quindi un profilo di marcia “ottimista” rispetto alle reali caratteristiche operative, nelle quali si può avere una performance dal 5 al 15 % inferiore.

2.2.1 Infrastruttura

OpenTrack modella la rete ferroviaria come un grafo a vertici doppi, questo permette di definire le manovre che è possibile fare nel caso in cui dallo stesso doppio-vertice si dipartano più di due archi.



Figura 23 Esempio di incrocio

Nell'incrocio sopra specificato solo alcune manovre sono possibili.

Manovra	Consentita?
A-C/C-A	SI
B-C/C-B	SI
A-B/B-A	NO

Figura 24 Manovre consentite all'incrocio

Le proprietà di vertici e archi possono essere definite tramite le rispettive finestre “Vertex Inspector” e “Edge Inspector” e sono di seguito riportate.

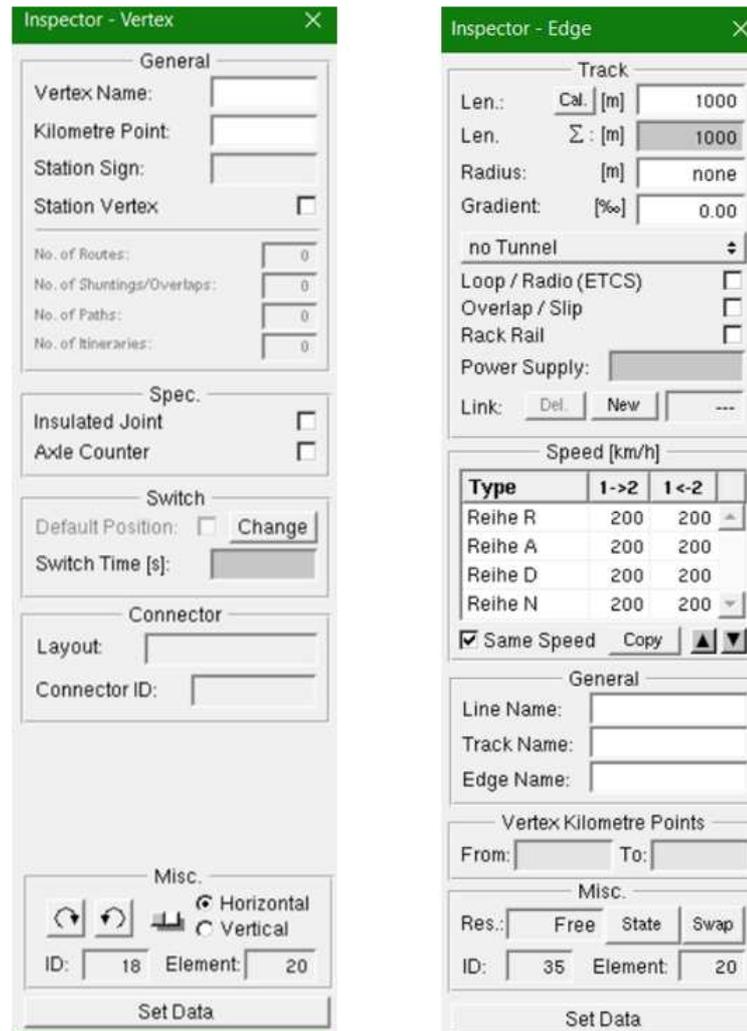


Figura 25 Finestre di editing vertici (sinistra) e archi (destra)

Sui vertici è poi possibile definire i segnali che permetteranno di creare gli itinerari per i treni. Vi sono diverse tipologie di segnali: principali, di avviso, per la definizione delle posizioni di fermata dei treni, indicanti le zone a velocità limitata, le zone dove attuare il coasting (marcia inerziale) e le zone non elettrificate.

Le stazioni sono impostate in tabella e inserite sul tracciato, tramite l'assegnazione di determinati vertici (colorazione blu) detti "Station Vertex". È possibile definire l'area della stazione inglobando i vertici vicini alla stazione nella "station area" (colorazione azzurra).

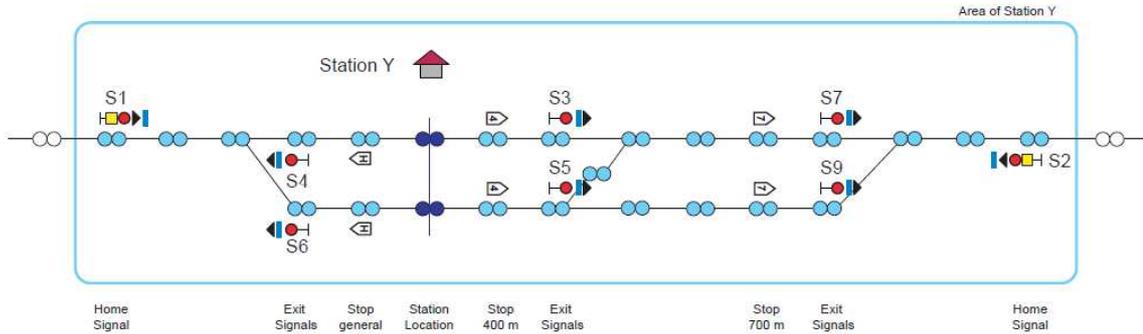


Figura 26 Esempio di stazione in OpenTrack [6]

Le sottostazioni per l'alimentazione elettrica sono modellizzate tramite degli elementi detti "Power Supply". A questi elementi si associano gli archi alimentati da quella stazione di alimentazione. Quando un treno si trova in un determinato arco i suoi consumi vengono assegnati alla stazione di servizio corrispondente.

2.2.2 Materiale rotabile

Data la variabilità nelle composizioni dei treni, OpenTrack utilizza due diversi moduli per la definizione del materiale rotabile.

Uno per la definizione dei locomotori "engines" e un altro per la composizione dei treni nel loro complesso "trains".

I treni vengono composti come un insieme di locomotori e di convogli trainati.

Nella figura vengono rappresentati possibili treni e come questi vengono modellizzati.

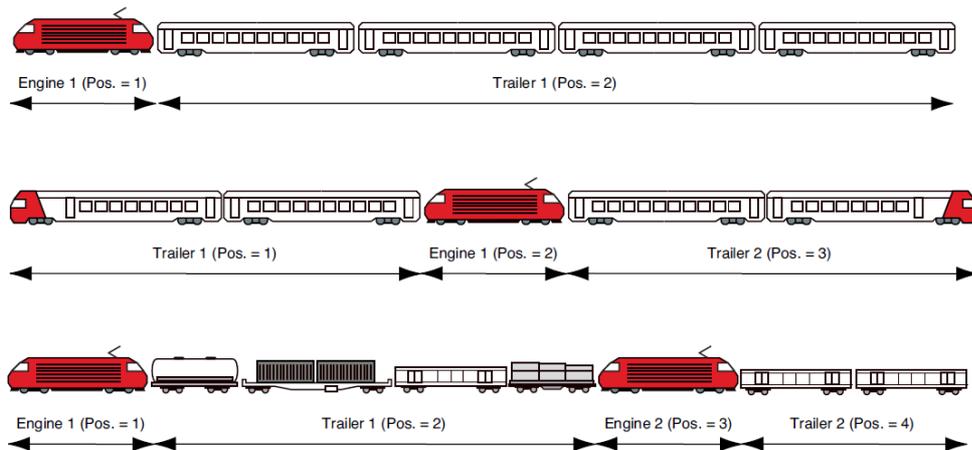


Figura 27 Esempi di treni (in rosso si riportano i locomotori) [6]

Le proprietà di treni e locomotori sono impostate nelle rispettive finestre.

Si assegnano in particolare massa, massa aderente, lunghezza, tipo di elettrificazione e curva di trazione in funzione della velocità.

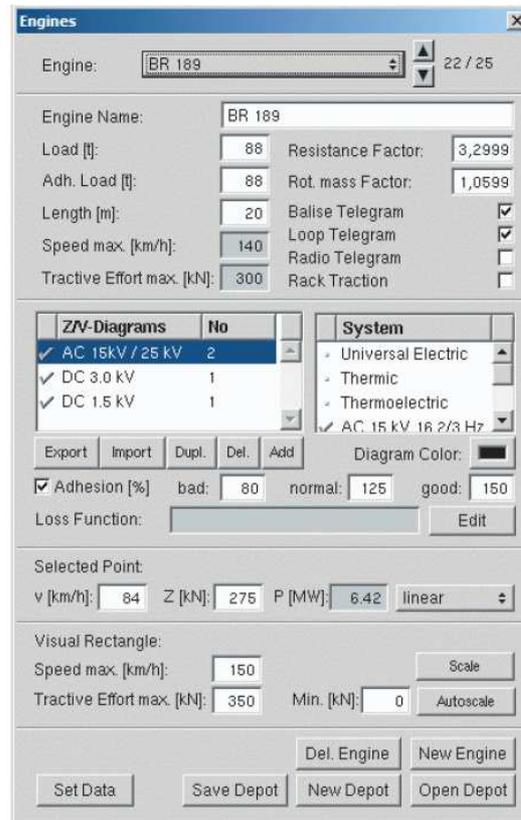


Figura 28 Finestra delle proprietà dei locomotori [6]

Una volta definiti i locomotori si passa alla definizione dei treni tramite l'altra finestra di editing.

The screenshot shows the 'Trains - Edit' window with the following sections:

- Train Name:** 4car
- Description:** (empty)
- Type:** Commuter / Regio Train
- Category:** Category 1
- Engines:**

Pos.	Name	Load [t]	Len. [m]
1	4 car (MTTM-hyperbolic)	212	90

Σ Load [t]: 212 Σ Len. [m]: 90
- Trailers:**

Pos.	Name	Load [t]	Len. [m]	P Loss
2	Trailer 1	50	180	

Σ Load [t]: 50 Σ Len. [m]: 180
- Resistance Equation:**

Rolling: Davis Formula $[F = m \cdot g / 1000 \cdot (A + B \cdot v + C \cdot v^2)]$

A: 3.200 B: 0.0340 C: 0.00047 Unit: N

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

Gradient: Distributed Mass per Train

Curve: Roeckl Formula Standard Gauge (Trains) [%]: 100.0
- Acceleration (Train related Settings):**

Max. Acceleration [m/s²]: 0.80 Max. Drawbar Force [kN]:

Acc. Delay [s]: 0 Min. Time to hold Speed [s]:

Acc. Delay at Stop [s]: 0
- Deceleration:**

Deceleration Function: Default

From [km/h]	To [km/h]	Dec. [m/s ²]
0	v max.	-1.00

Braked Weight Percentage (BWP) [%]: 100

$a = -(C1 + C2 \cdot BWP)$ C1: C2: Result [m/s²]:

Correct Deceleration on Gradients [m/s²/‰]

Min. Dec. [m/s²]: Max. [m/s²]:

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

Figura 29 Esempio di treno

Si assembla il treno inserendo i rispettivi locomotori precedentemente creati e si aggiungono poi i vagoni trainati (se presenti) dei quali si specificano lunghezza e massa.

In questa finestra sono da impostare le formule per il calcolo delle resistenze al rotolamento, alla pendenza e in curva.

Per il rotolamento sono disponibili le seguenti formule:

- formula di Strahl e di Sauthoff, dove si applicano formule diverse per diversi tipi di veicoli (locomotive, vagoni passeggeri, vagoni merci);
- formula di Davis dove si ha una formula unificata per tutto il treno;
- formula Maglev, per mezzi a levitazione magnetica.

Il calcolo della resistenza in caso di pendenza può essere fatto considerando la massa del treno distribuita uniformemente lungo singoli vagoni o per tutta la lunghezza del treno.

Per la resistenza in curva si può scegliere la formula di Roeckl per i treni, la formula per i tram o una formula alternativa che è possibile calibrare.

I calcoli svolti da OpenTrack per il calcolo della resistenza totale sono qui di seguito riportati.

Resistenza totale del treno:

$$R = R_F + R_a$$

R:	Total Resistance	[R] = N
R _F :	Traction Resistance	[R _F] = N
R _a :	Acceleration Resistance	[R _a] = N

- Resistenza di trazione:

$$R_F = R_L + R_{str}$$

R _F :	Traction Resistance	[R _F] = N
R _L :	Rolling Resistance	[R _L] = N
R _{str} :	Distance Resistance	[R _{str}] = N

• Resistenza al rotolamento

$R_L = R_{LT} + R_{LP} + R_T$	Strahl/Sauthoff (Personenzüge / Passenger Trains)
$R_L = R_{LT} + R_{LG} + R_T$	Strahl/Sauthoff (Güterzüge / Freight Trains)
$R_L = R_{LZ} + R_T$	Davis, Maglev

Le singole formule sono empiriche e tarate da coefficienti di calibrazione per diverse tipologie di mezzi.

• Resistenza di distanza

$$R_{str} = R_s + R_B + R_w$$

R _{str} :	Distance Resistance	[R _{str}] = N
R _s :	Gradient resistance	[R _s] = N
R _B :	Curve resistance	[R _B] = N
R _w :	Switch resistance	[R _w] = N

La resistenza dello switch è in genere trascurabile.

○ Resistenza alla pendenza

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

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

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

Dove le varie componenti sono così rappresentate in un disegno:

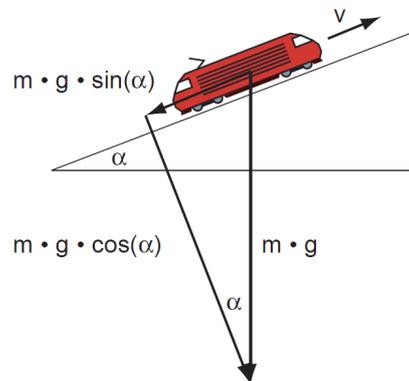


Figura 30 Resistenza di pendenza [6]

○ Resistenza in curva

in caso di scartamento standard si utilizzano in genere le seguenti formule per i treni.

$$R_B = \frac{6,3}{r-55} \cdot m \quad \text{for } r \geq 300 \text{ m}$$

$$R_B = \frac{4,91}{r-30} \cdot m \quad \text{for } r < 300 \text{ m}$$

R_B :	Curve resistance	$[R_B] = \text{N}$
r :	Curve radius	$[r] = \text{m}$
m :	Train weight (mass)	$[m] = \text{kg}$

- Resistenza di accelerazione:

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

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

Il treno sperimenta una resistenza quando accelera o quando decelera, questa forza resistente è proporzionale alla sua accelerazione ed alla sua massa.

Per quanto riguarda la decelerazione è possibile definire in diversi range di velocità quale valore di decelerazione utilizzare.

2.2.3 Orari e percorsi

Una volta definiti materiale rotabile e infrastruttura, si inseriscono in OpenTrack i percorsi che i vari treni devono seguire tramite un sistema gerarchico. Tra ogni coppia di segnali si ha una route (strada), più route costituiscono un path (percorso) e più path formano un itinerary (itinerario).

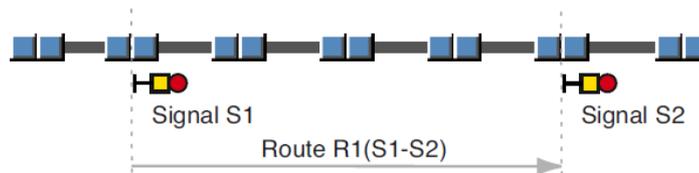


Figura 31 Esempio di path [6]

Si avrà quindi il seguente schema:

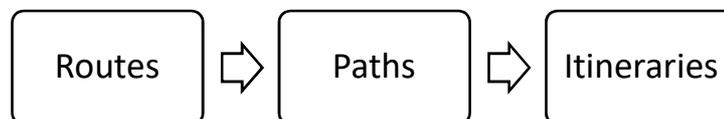


Figura 32 Schema di definizione dei percorsi

Dopo aver definito i percorsi è necessario stabilire i treni che seguiranno quei percorsi, il tipo di blocco da utilizzare (mobile o fisso) e le performance in caso di ritardo o in caso di treno puntuale. Questi aspetti vengono definiti nella creazione delle courses (corse).

Una volta definite le corse si definiscono nella finestra timetable gli orari che il treno deve rispettare e se e quanto il treno debba fermarsi o meno nelle stazioni in cui passa.

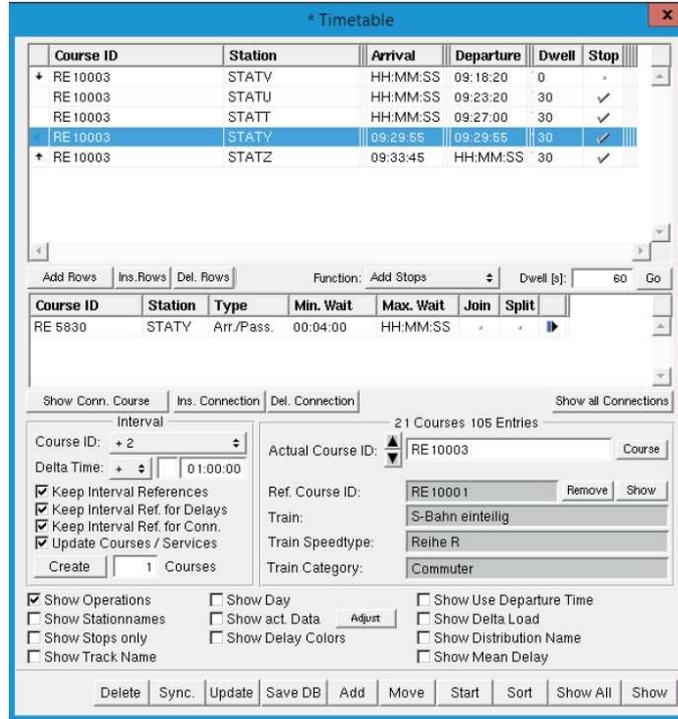


Figura 33 Esempio di tabella oraria (timetable) [6]

2.2.4 Simulazione

Come già osservato in precedenza OpenTrack utilizza una logica mista dove il moto dei treni si calcola in continuo tramite la seconda equazione fondamentale della dinamica già citata in precedenza.

$$F - R = m \cdot a$$

La differenza tra F (forza di trazione) ed R (resistenza al moto) viene detta potenza di trazione in eccesso F_z .

I valori delle forze di trazione vengono ricavati dal grafico forza/velocità e dipendono quindi dalla velocità e dalle condizioni di aderenza della linea.

Le resistenze dipendono invece dalla velocità e dal tracciato.

Noti questi valori è possibile ricavare F_z e calcolare quindi l'accelerazione massima in ogni punto del tracciato.

Una volta noti i valori delle accelerazioni, integrando è possibile ricavare i valori delle velocità e degli spostamenti secondo le seguenti formule:

$$v = v_0 + \int_{t_1}^{t_2} a dt$$

$$s = s_0 + \int_{t_1}^{t_2} v dt$$

Per quanto riguarda invece la simulazione del comportamento in frenatura è difficile definire un modello che simuli il comportamento reale in frenata. Per questo OpenTrack utilizza i livelli di decelerazione impostati nella definizione delle caratteristiche del treno, ovvero ad ogni intervallo di velocità fa corrispondere un livello di decelerazione diverso.

Il sistema di segnalamento lavora invece in modo discontinuo per i sistemi a blocco fisso e in continuo per sistemi a blocco mobile.

In sistemi a blocco fisso durante la marcia del treno vengono riservate tutte le routes a valle del treno, concordemente al numero di aspetti del relativo segnale di protezione. Requisito fondamentale per una circolazione sicura è che il treno sia in grado di giungere a completo arresto all'interno di tali sezioni.

In sistemi a blocco mobile vengono riservate in continuo le sezioni di tracciato di fronte al treno senza tener conto delle singole routes, ma prendendo in considerazione solo la distanza di frenatura del treno (l'utente può aggiungere un margine di sicurezza per tenere conto di errori e dei tempi di comunicazione terra-treno).

OpenTrack permette di controllare la simulazione tramite un'interfaccia grafica dove si “vedono” virtualmente i treni che percorrono l'infrastruttura durante la simulazione.



Figura 34 Esempio di interfaccia di simulazione [6]

2.2.5 Output

OpenTrack offre diversi tipi di dati come risultato delle simulazioni. I file di output delle simulazioni vengono salvati in automatico in una cartella in vari formati, ognuno dei quali indica contenuti diversi. Si possono inoltre ottenere direttamente delle elaborazioni grafiche già sviluppate da OpenTrack come gli orari grafici.

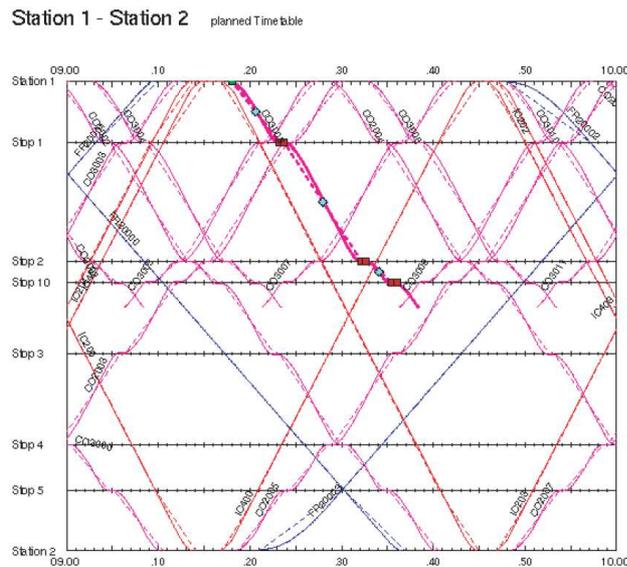


Figura 35 Esempio di orario grafico [6]

Questi orari grafici possono anche essere editati e si può quindi da questi modificare le corse precedentemente impostate.

Dai file forniti invece, è possibile ottenere delle rappresentazioni cartesiane indicanti le diverse variabili, ad esempio grafici spazio/velocità riguardanti la marcia di un singolo treno.

In alternativa i file possono essere aperti in Excel ed utilizzati per ulteriori analisi.

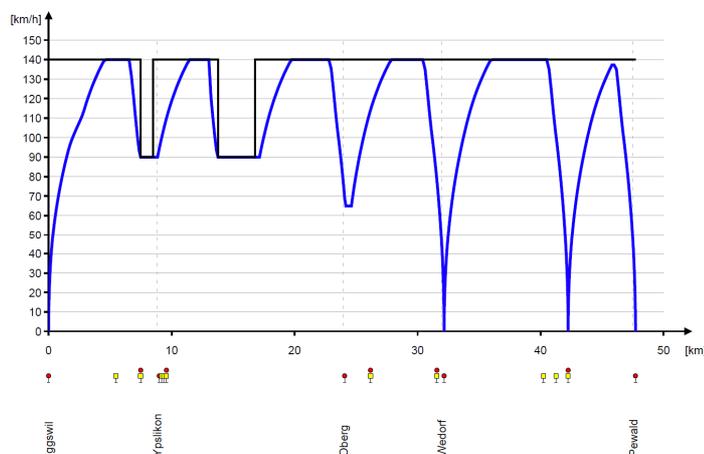


Figura 36 Esempio di diagramma spazio/velocità [6]

3 MODELLAZIONE PROGETTO DEFINITIVO

3.1 LINEA OGGETTO DI STUDIO

3.1.1 Sviluppo della rete metropolitana di Istanbul

Istanbul è il principale centro industriale, culturale e finanziario della Turchia. È una grande metropoli che con i suoi circa 15 milioni di abitanti costituisce il centro urbano più popoloso d'Europa ed è tra le 10 città più popolate al mondo. Ha conosciuto negli ultimi anni un importante sviluppo demografico, dovuto principalmente allo sviluppo economico del paese ed al fenomeno dell'urbanizzazione.

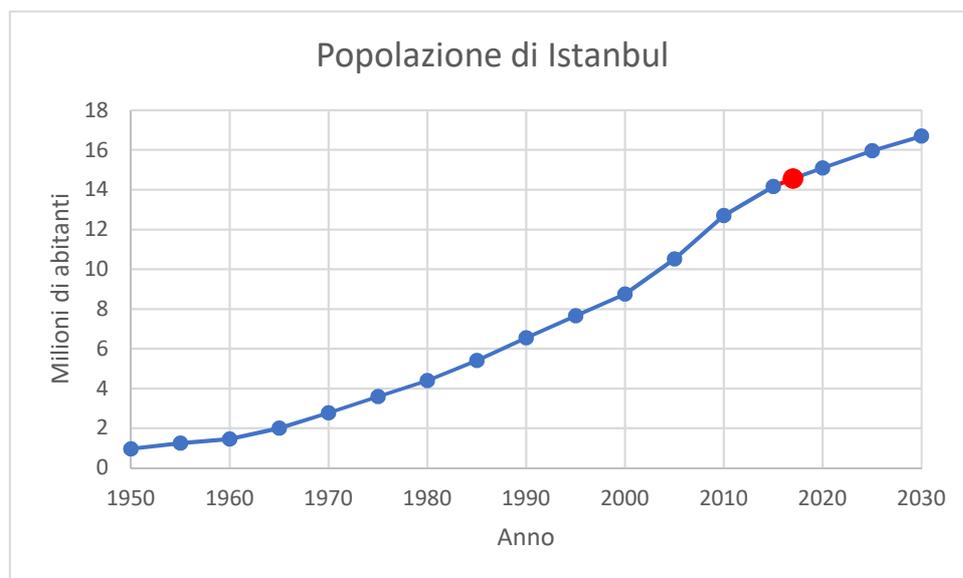


Figura 37 Popolazione di Istanbul dal 1950 al 2030 [c]

Come si può osservare nel grafico la popolazione è quasi decuplicata negli ultimi 60 anni.

Per questo motivo l'amministrazione ha dato il via a piani di espansione e potenziamento dei trasporti pubblici ed in particolare della rete metropolitana, con l'obiettivo di sopperire alle attuali mancanze, che hanno portato negli ultimi anni all'aggravarsi dei fenomeni di congestionamento stradale nella città.

Istanbul risulta infatti essere tra le città più trafficate d'Europa e del mondo. Dai dati raccolti dall'applicativo di localizzazione satellitare Tomtom, Istanbul risulta essere attualmente la sesta città più trafficata al mondo con un livello di congestionamento pari al 49% nel 2016 [i].

Per livello di congestionamento si intende la percentuale di tempo speso in più per spostarsi in media nelle ore di punta, rispetto alle condizioni di flusso libero (free flow).

La pubblica amministrazione ha istituito un piano per la realizzazione di numerose linee metropolitane, con l'obiettivo di rafforzare i trasporti pubblici cittadini. Tra il 2016 e il 2019 si prevede infatti la costruzione di un totale di quasi 500 km di nuove linee metropolitane.



Figura 38 Sviluppo della rete metropolitana di Istanbul [j]

3.1.2 Linea Havalimani-Gayrettepe

La linea oggetto di studio in particolare fa parte delle linee con ultimazione prevista entro il 2019 e collegherà il nuovo aeroporto di Istanbul con la località di Gayrettepe, importante centro economico della città.

La linea nasce appunto con l'intento di dare un collegamento rapido ed efficiente al nuovo aeroporto cittadino, il terzo aeroporto di Istanbul.

Questo aeroporto riveste un importante ruolo strategico per la città e si prevede che, a realizzazione ultimata, sarà il più grande aeroporto al mondo, con una capacità massima stimata di circa 150 milioni di passeggeri all'anno e un'area di 77 km².



Figura 39 Nuovo aeroporto di Istanbul [k]

Il progetto nel suo complesso prevede in una prima fase il collegamento di Gayrettepe all'aeroporto ed in una seconda fase il completamento della linea proseguendo il tracciato fino alla località di Halkali, sul Mar di Marmara. In questa tesi si tratteranno le simulazioni riguardanti la prima tratta (in giallo in figura).



Figura 40 Collegamenti metropolitani al nuovo aeroporto

Della linea sono stati forniti i dati riguardanti tracciato verticale e orizzontale, le posizioni delle stazioni e le posizioni degli scambi (switches). Tali dati sono forniti dallo studio di ingegneria Yüksel Proje, incaricato della stesura del progetto definitivo. Yüksel Proje ha già svolto le simulazioni di servizio ferroviario sulla linea. I dati di input e i risultati di queste simulazioni sono noti ed è quindi possibile calibrare il modello OpenTrack con un confronto.

I dati di input necessari per le simulazioni sono sintetizzati qui di seguito.

La linea è composta da 2 canne separate, una per direzione di marcia, connesse tra loro da scambi. Dai piani elaborati in Civil 3D si sono estratte in formato tabellare le informazioni planimetriche e altimetriche del tracciato.

No.	Number	Type	Length	Radius	PK Start	PK End
1	1	Line	551.755m		-0+056.33m	0+495.42m
2.1	2	Spiral	65.000m		0+495.42m	0+560.42m
2.2	2	Curve	180.610m	1'016'000	0+560.42m	0+741.03m
2.3	2	Spiral	65.000m		0+741.03m	0+806.03m
3	3	Line	232.049m		0+806.03m	1+038.08m

Figura 41 Esempio di parte del tracciato planimetrico

No.	PVI Station	Grade In	Grade Out	Profile Curve Type	Profile Curve Length	Curve Radius
1	-0+056.33m		-0.25%			
2	0+115.00m	-0.25%	0.00%	Sag	60.000m	24000.000m
3	0+437.00m	0.00%	-2.00%	Crest	143.971m	7200.000m
4	1+165.00m	-2.00%	-3.59%	Crest	238.179m	15000.000m
5	2+925.00m	-3.59%	-0.87%	Sag	543.610m	20000.000m
6	3+645.00m	-0.87%	0.00%	Sag	217.353m	25000.000m

Figura 42 Esempio di parte del tracciato altimetrico

Secondo i vincoli della linea i limiti di raggio rispettivamente per curve orizzontali e verticali sono pari a 750 m e 2000 m, mentre le pendenze massime non possono superare il 4%.

Per le simulazioni del progetto definitivo la linea ha una lunghezza di circa 34 km per un totale di 7 stazioni, con distanza media tra le stazioni di 5.6 km circa.

Lo scartamento tra i binari in acciaio è quello standard pari a 1435mm.

La linea è alimentata da un sistema a catenarie rigide, che fornisce energia elettrica a corrente continua (CC) ad un voltaggio di 1500 V. L'alimentazione fa capo alla rete elettrica turca Teias, che fornisce corrente alle 12 sottostazioni, 7 delle quali sono posizionate nelle stazioni passeggeri.

Dal punto di vista operativo, i treni avranno una frequenza di 5 minuti, la linea sarà pienamente automatica UTO (GoA 4) e il sistema di segnalamento utilizzerà il blocco mobile.

L'intento principale della linea è quello di collegare il centro città all'aeroporto e quindi il limite di velocità sarà pari a 120 km/h, piuttosto alto, ma giustificato dalle necessità di tempi di spostamento ridotti e dalle distanze inter-stazione elevate.

Nelle zone interne alle stazioni il treno potrà viaggiare al massimo a 50 km/h mentre negli scambi a non più di 40 km/h.

Nelle stazioni il tempo di sosta varierà tra 25 e 35 secondi per le stazioni di Gayrettepe e Kagithane, mentre per le restanti stazioni sarà compreso tra 20 e 30 secondi.

Per quanto riguarda i veicoli impiegati, questi avranno una lunghezza pari a quella delle stazioni ovvero di 180 m, valore elevato che scaturisce dalla necessità di avere alte capacità di linea. Le massime accelerazioni e decelerazioni per il servizio ordinario sono rispettivamente di 0.8 m/s^2 e -1 m/s^2 . La velocità massima dei treni sarà pari al limite di velocità in linea aperta (120 km/h).

La massa a vuoto è di 37 tonnellate, mentre con carico massimo (AW3 corrispondente ad una densità di 6 persone/m²) è di 53 tonnellate. La percentuale di masse rotanti è del 10%.

Sono state inoltre fornite le curve di trazione e di frenatura in funzione della velocità.

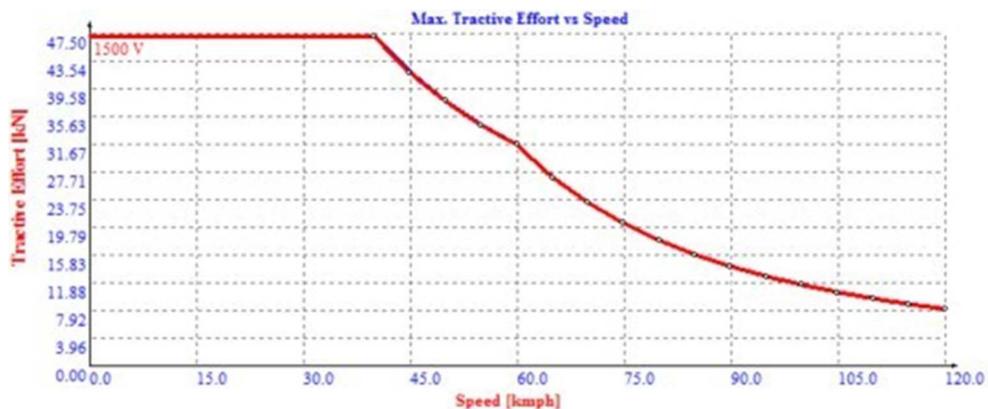


Figura 43 Curva di trazione

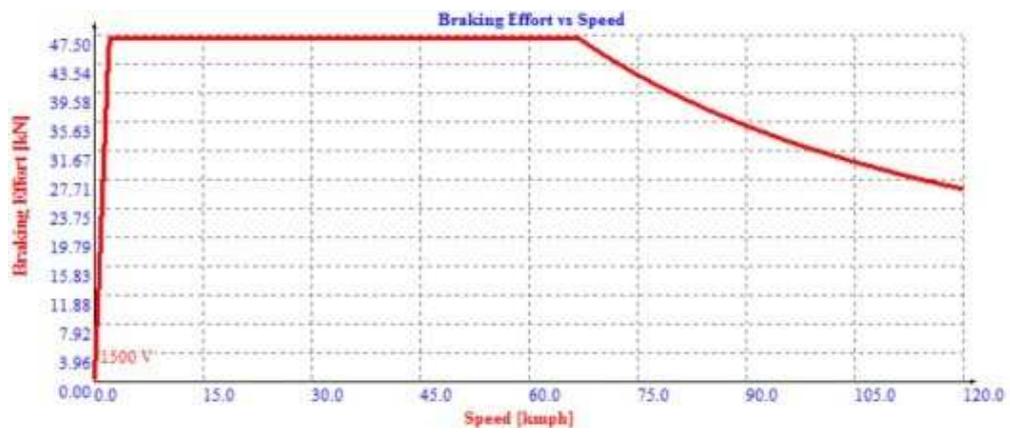


Figura 44 Curva di frenatura

3.2 MODELLAZIONE E DATI DI INPUT

3.2.1 Obiettivi e fasi della modellazione

Si procede ora alla modellazione della linea sul programma di simulazione OpenTrack, con l'obiettivo di definire i tempi di percorrenza, i consumi energetici, le velocità commerciali, le capacità della linea e altre caratteristiche operative.

In particolare si vuole convalidare il modello OpenTrack, verificando che i risultati ottenuti siano analoghi a quelli ottenuti dallo studio Yüksel Proje nell'elaborazione delle loro simulazioni. Questo è importante per poter definire correttamente i dati di input dai quali partire per l'elaborazione del progetto esecutivo.

Si hanno infatti a disposizione i risultati delle simulazioni di servizio ferroviario che il sopraindicato studio di ingegneria ha sviluppato con il software SimuX.

Da un confronto tra le due simulazioni è possibile definire con più precisione le ipotesi che si sono prese in considerazione nelle analisi precedenti e verificare che i dati forniti siano corretti.

Le fasi della modellazione sono le seguenti:

- in primo luogo si inseriranno i dati riguardanti la linea e il materiale rotabile nel programma;
- poi si definiranno le simulazioni da effettuare, definendo partenze, arrivi e tempi di sosta nella tabella oraria e i percorsi che i vari treni dovranno seguire;
- infine si lancerà la simulazione e si otterranno i dati di output dai quali si estrapoleranno le informazioni.

3.2.2 Inserimento dei dati di input del tracciato

Si inseriscono dapprima nel programma tutti i punti che rappresentano una discontinuità sulle due linee, L1 da Gayrettepe ad Havalimani-1 e L2 da Havalimani-1 a Gayrettepe. Questi risultano essere in particolare:

- inizio e fine delle curve;
- cambi di pendenza;
- inizio, centro e fine delle stazioni;
- scambi e tronchini di sicurezza;

- limiti delle zone di alimentazione elettrica delle sottostazioni.

Per facilitare il processo si inseriscono dapprima i punti di inizio e fine curva, che risultano essere i punti più numerosi, tra questi si inseriranno poi le altre discontinuità.

Le clotoidi vengono considerate come rettilinei e trascurati nei calcoli in quanto OpenTrack non permette l'inserimento di tratti a raggio variabile, inoltre la presenza di clotoidi non influisce in maniera rilevante sui risultati, in quanto queste hanno una lunghezza ridotta.

I tratti modellizzati sono elencati nelle seguenti tabelle, rispettivamente per la linea L1 (da Gayrettepe a Havalimanti-1) e per la linea L2 (da Havalimani-1 a Gayrettepe).

Tracciato planimetrico L1			
ID	Raggio	Progr. Inizio	Progr. Fine
[-]	[m]	[m]	[m]
1	0	-0+056.33m	0+560.42m
2	1016	0+560.42m	0+741.03m
3	0	0+741.03m	1+038.08m
4	4500	1+038.08m	1+132.47m
5	0	1+132.47m	1+358.89m
6	710	1+358.89m	2+468.56m
7	0	2+468.56m	2+708.11m
8	684	2+708.11m	3+563.32m
9	0	3+563.32m	4+288.02m
10	4000	4+288.02m	4+365.51m
11	0	4+365.51m	4+442.90m
12	4000	4+442.90m	4+520.38m
13	0	4+520.38m	4+714.89m
14	2500	4+714.89m	4+805.52m
15	0	4+805.52m	4+942.92m
16	2500	4+942.92m	5+033.55m
17	0	5+033.55m	5+510.39m
18	834	5+510.39m	5+689.18m
19	0	5+689.18m	6+175.35m
20	984	6+175.35m	6+748.22m
21	0	6+748.22m	7+107.68m
22	1000	7+107.68m	7+575.61m
23	0	7+575.61m	8+262.13m
24	992	8+262.13m	8+534.36m
25	0	8+534.36m	9+143.61m
26	5000	9+143.61m	9+233.55m
27	0	9+233.55m	9+310.39m
28	5000	9+310.39m	9+400.33m
29	0	9+400.33m	9+593.03m
30	2500	9+593.03m	9+683.66m
31	0	9+683.66m	9+821.07m
32	2500	9+821.07m	9+911.70m
33	0	9+911.70m	10+154.41m
34	866	10+154.41m	10+942.14m
35	0	10+942.14m	11+634.10m
36	1750	11+634.10m	13+099.45m
37	0	13+099.45m	13+811.64m
38	1750	13+811.64m	14+335.27m
39	0	14+335.27m	14+993.67m

ID	Raggio	Progr. Inizio	Progr. Fine
[-]	[m]	[m]	[m]
40	2016	14+993.67m	15+912.80m
41	0	15+912.80m	16+641.31m
42	934	16+641.31m	17+499.51m
43	0	17+499.51m	18+195.51m
44	2016	18+195.51m	20+077.10m
45	0	20+077.10m	20+962.42m
46	2300	20+962.42m	21+045.56m
47	0	21+045.56m	21+186.11m
48	2300	21+186.11m	21+269.25m
49	0	21+269.25m	21+463.28m
50	3000	21+463.28m	21+986.94m
51	0	21+986.94m	23+266.36m
52	1984	23+266.36m	23+836.42m
53	0	23+836.42m	24+438.56m
54	2500	24+438.56m	24+529.83m
55	0	24+529.83m	24+665.39m
56	2500	24+665.39m	24+756.66m
57	0	24+756.66m	24+984.56m
58	2500	24+984.56m	25+075.83m
59	0	25+075.83m	25+211.39m
60	2500	25+211.39m	25+302.66m
61	0	25+302.66m	26+054.99m
62	1750	26+054.99m	26+828.25m
63	0	26+828.25m	27+133.17m
64	5000	27+133.17m	27+223.65m
65	0	27+223.65m	27+298.97m
66	5000	27+298.97m	27+389.45m
67	0	27+389.45m	28+264.66m
68	3016	28+264.66m	28+669.15m
69	0	28+669.15m	29+181.31m
70	930	29+181.31m	29+350.02m
71	0	29+350.02m	29+588.81m
72	5000	29+588.81m	29+679.04m
73	0	29+679.04m	29+755.07m
74	5000	29+755.07m	29+845.30m
75	0	29+845.30m	30+450.24m
76	1208	30+450.24m	31+225.36m
77	0	31+225.36m	34+519.30m
78	1258	34+519.30m	36+953.23m
79	0	36+953.23m	37+933.78m

Figura 45 Tracciato planimetrico L1

Tracciato planimetrico L2							
ID	Raggio	Progr. Inizio	Progr. Fine	ID	Raggio	Progr. Inizio	Progr. Fine
[-]	[m]	[m]	[m]	[-]	[m]	[m]	[m]
1	0	-0+056.33m	0+691.80m	43	0	15+999.44m	16+435.53m
2	700	0+691.80m	0+786.02m	44	3000	16+435.53m	16+528.82m
3	0	0+786.02m	1+034.90m	45	0	16+528.82m	16+700.35m
4	10000	1+034.90m	1+129.01m	46	800	16+700.35m	17+439.75m
5	0	1+129.01m	1+366.10m	47	0	17+439.75m	18+211.62m
6	690	1+366.10m	2+416.42m	48	1984	18+211.62m	20+063.12m
7	0	2+416.42m	2+641.34m	49	0	20+063.12m	20+948.32m
8	716	2+641.34m	3+545.30m	50	2300	20+948.32m	21+031.45m
9	0	3+545.30m	4+270.85m	51	0	21+031.45m	21+172.00m
10	4000	4+270.85m	4+348.34m	52	2300	21+172.00m	21+255.14m
11	0	4+348.34m	4+425.73m	53	0	21+255.14m	21+576.72m
12	4000	4+425.73m	4+503.21m	54	3000	21+576.72m	22+100.38m
13	0	4+503.21m	4+697.72m	55	0	22+100.38m	23+256.05m
14	2500	4+697.72m	4+788.35m	56	2016	23+256.05m	23+835.54m
15	0	4+788.35m	4+925.75m	57	0	23+835.54m	24+437.80m
16	2500	4+925.75m	5+016.38m	58	2500	24+437.80m	24+529.07m
17	0	5+016.38m	5+493.97m	59	0	24+529.07m	24+664.63m
18	866	5+493.97m	5+681.16m	60	2500	24+664.63m	24+755.90m
19	0	5+681.16m	6+168.60m	61	0	24+755.90m	24+983.80m
20	1016	6+168.60m	6+761.16m	62	2500	24+983.80m	25+075.07m
21	0	6+761.16m	7+143.89m	63	0	25+075.07m	25+210.63m
22	1000	7+143.89m	7+611.82m	64	2500	25+210.63m	25+301.90m
23	0	7+611.82m	8+262.75m	65	0	25+301.90m	26+038.01m
24	1008	8+262.75m	8+539.90m	66	2000	26+038.01m	26+926.02m
25	0	8+539.90m	9+149.40m	67	0	26+926.02m	27+120.55m
26	5000	9+149.40m	9+239.34m	68	5000	27+120.55m	27+211.03m
27	0	9+239.34m	9+316.18m	69	0	27+211.03m	27+286.34m
28	5000	9+316.18m	9+406.12m	70	5000	27+286.34m	27+376.82m
29	0	9+406.12m	9+598.82m	71	0	27+376.82m	28+133.45m
30	2500	9+598.82m	9+689.45m	72	2984	28+133.45m	28+533.65m
31	0	9+689.45m	9+826.86m	73	0	28+533.65m	29+068.44m
32	2500	9+826.86m	9+917.49m	74	1016	29+068.44m	29+269.68m
33	0	9+917.49m	10+159.45m	75	0	29+269.68m	29+578.40m
34	834	10+159.45m	10+916.59m	76	5000	29+578.40m	29+668.62m
35	0	10+916.59m	11+601.37m	77	0	29+668.62m	29+744.65m
36	1750	11+601.37m	13+066.72m	78	5000	29+744.65m	29+834.88m
37	0	13+066.72m	13+754.21m	79	0	29+834.88m	30+439.65m
38	1750	13+754.21m	14+277.84m	80	1192	30+439.65m	31+204.18m
39	0	14+277.84m	15+062.46m	81	0	31+204.18m	34+497.79m
40	1800	15+062.46m	15+754.38m	82	1242	34+497.79m	36+900.45m
41	0	15+754.38m	15+900.96m	83	0	36+900.45m	37+884.51m
42	2000	15+900.96m	15+999.44m				

Figura 46 Tracciato planimetrico L2

Le progressive sopra riportate vengono inserite nei vertici creati su OpenTrack. Tra questi vertici si posizionano i vari archi, nei quali si inseriranno i valori relativi ai raggi delle rispettive tratte.

Per introdurre invece le pendenze si inseriscono i vertici tra i nodi precedentemente creati, alle progressive in cui si ha un cambio di pendenza.

Questi dati si ricavano dalle tabelle seguenti, nelle quali si rappresentano i dati riguardanti il profilo altimetrico nei due sensi di marcia.

Profilo altimetrico L1			
ID	Progr. Inizio	Progr. Fine	Pendenza
[-]	[m]	[m]	[%]
1	-0+056.33m	0+115.00m	-0.25%
2	0+115.00m	0+437.00m	0.00%
3	0+437.00m	1+165.00m	-2.00%
4	1+165.00m	2+925.00m	-3.59%
5	2+925.00m	3+645.00m	-0.87%
6	3+645.00m	4+059.00m	0.00%
7	4+059.00m	4+444.60m	0.25%
8	4+444.60m	4+900.00m	0.67%
9	4+900.00m	9+260.00m	1.50%
10	9+260.00m	10+850.00m	-1.16%
11	10+850.00m	13+250.00m	-1.86%
12	13+250.00m	14+370.00m	2.82%
13	14+370.00m	14+930.00m	0.00%
14	14+930.00m	15+300.00m	-3.69%
15	15+300.00m	15+800.00m	-1.56%
16	15+800.00m	16+620.00m	0.00%
17	16+620.00m	17+580.00m	0.86%
18	17+580.00m	18+020.00m	0.00%
19	18+020.00m	22+815.00m	0.25%
20	22+815.00m	26+550.00m	0.50%
21	26+550.00m	27+600.00m	1.13%
22	27+600.00m	28+120.00m	0.00%
23	28+120.00m	28+522.54m	0.25%
24	28+522.54m	31+525.00m	0.43%
25	31+525.00m	32+180.00m	0.00%
26	32+180.00m	33+090.00m	0.50%
27	33+090.00m	33+600.00m	-0.50%
28	33+600.00m	34+185.00m	0.00%
29	34+185.00m	36+340.00m	-0.50%

Figura 47 Profilo altimetrico L1

Profilo altimetrico L2			
ID	Progr. Inizio	Progr. Fine	Pendenza
[-]	[m]	[m]	[%]
1	-0+056.33m	0+115.00m	-0.25%
2	0+115.00m	0+432.24m	0.00%
3	0+432.24m	1+175.00m	-2.00%
4	1+175.00m	2+856.00m	-3.72%
5	2+856.00m	3+628.00m	-0.85%
6	3+628.00m	4+040.00m	0.00%
7	4+040.00m	4+427.00m	0.25%
8	4+427.00m	4+890.00m	0.67%
9	4+890.00m	9+270.00m	1.49%
10	9+270.00m	10+765.00m	-1.16%
11	10+765.00m	13+250.08m	-1.85%
12	13+250.08m	14+357.65m	2.86%
13	14+357.65m	14+919.87m	0.00%
14	14+919.87m	15+283.91m	-3.75%
15	15+283.91m	15+778.84m	-1.57%
16	15+778.84m	16+589.30m	0.00%
17	16+589.30m	17+600.00m	0.81%
18	17+600.00m	18+005.89m	0.00%
19	18+005.89m	22+827.81m	0.25%
20	22+827.81m	26+528.01m	0.50%
21	26+528.01m	27+587.38m	1.13%
22	27+587.38m	28+107.70m	0.00%
23	28+107.70m	28+519.08m	0.25%
24	28+519.08m	31+514.58m	0.43%
25	31+514.58m	32+158.65m	0.00%
26	32+158.65m	33+068.65m	0.50%
27	33+068.65m	33+578.65m	-0.50%
28	33+578.65m	34+167.20m	0.00%
29	34+167.20m	37+884.51m	-0.50%

Figura 48 Profilo altimetrico L2

Anche in questo caso i dati di pendenza si inseriscono negli archi tra le rispettive progressive di cambio pendenza.

Si inseriscono quindi le stazioni, delle quali si riportano inizio, metà e fine. Nelle progressive di inizio e fine banchina andranno posizionati i segnali, mentre a metà banchina si posizionerà il punto di sosta dei treni. Le progressive di seguito riportate sono valide sia per la linea 1 che per la linea 2.

Stazioni				
ID	Stazione	Inizio banchina	Metà banchina	Fine banchina
[-]	[-]	[m]	[m]	[m]
A	Gayrettepe	0+163.67	0+253.67	0+343.67
B	Kağıthane	3+789.35	3+879.35	3+969.35
C	Kamerburgaz	14+530.34	14+620.34	14+710.34
D	Göktürk	17+698.37	17+788.37	17+878.37
E	İhsaniye	27+852.84	27+942.84	28+032.84
F	Havalimani-2	31+729.50	31+819.5	31+909.50
G	Havalimani-1	33+900.42	33+990.42	34+080.42

Figura 49 Dati riguardanti le stazioni

Le stazioni saranno quindi così modellate.

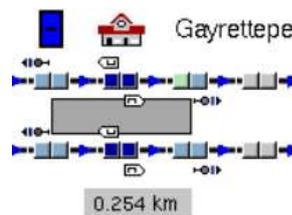


Figura 50 Stazione di Gayrettepe modellata in OpenTrack

Si inseriscono quindi gli scambi e il tronchino intermedio per la sosta del treno, i dati sono sintetizzati nella seguente tabella e valgono per entrambe le direzioni di marcia.

Scambi		
ID	Inizio	Fine
[-]	[m]	[m]
S1	0+881.47	1+004.71
S2	4+526.13	4+649.36
S3	9+427.24	9+550.47
S4	16+049.79	16+415.17
S5	21+305.71	21+428.94
S6	24+806.84	24+930.07
S7	26+976.15	27+099.38
S8	29+434.80	29+558.03
S9	33+703.18	33+880.42

Figura 51 Progressive di scambi e tronchino (S4)

Gli scambi devono essere modellati in OpenTrack inserendo degli vertici che isolino tra loro i tracciati nei due sensi di marcia, per evitare che un treno che sta procedendo in una direzione riservi anche una parte della linea nella direzione opposta, compromettendone il servizio. Questi vertici sono detti “insulated joints” e sono evidenziati in rosso in figura.

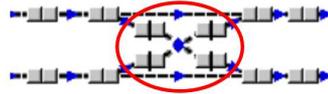


Figura 52 Scambio modellato in OpenTrack

Una volta inseriti questi elementi di tracciato su OpenTrack si può passare all’inserimento delle sottostazioni per l’alimentazione elettrica.

Sono note le posizioni delle sottostazioni, da queste è necessario ricavare le zone di pertinenza, ovvero le zone alimentate da ogni sottostazione.

Per fare ciò si considera che ogni sottostazione alimenti una tratta che va dalla progressiva a metà strada tra la sottostazione precedente e quella considerata alla progressiva a metà strada tra la sottostazione considerata e quella seguente.

Di seguito viene riportato uno schema a titolo esemplificativo.

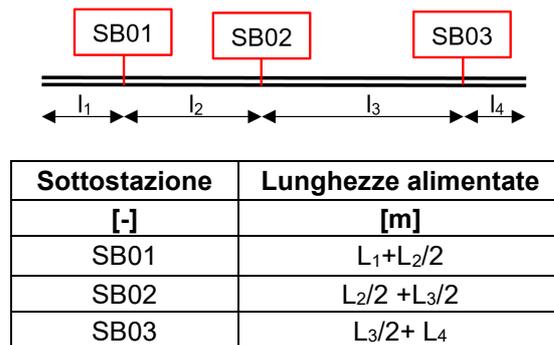


Figura 53 Esempio schema di alimentazione elettrica

Si ricavano quindi le progressive poste a metà strada tra le stazioni per definire le zone di alimentazione.

I dati reali della linea sono sintetizzati nella seguente tabella per entrambe le direzioni di marcia (L1 e L2).

ID	Progressive di allacciamento [m]		Progressive di alimentazione [m]			
	L1	L2	L1 Inizio	L1 Fine	L2 Inizio	L2 Fine
SB01	210	410	0	1180	0	1280
SB02	2150	2150	1180	3000	1280	3100
SB03	3850	4050	3000	5450	3100	5550
SB04	7050	7050	5450	8725	5550	8725
SB05	10400	10400	8725	12496	8725	12596
SB06	14591	14791	12496	16161	12596	16361
SB07	17731	17931	16161	18841	16361	18941
SB08	19950	19950	18841	21959	18941	21959
SB09	23968	23968	21959	25924	21959	26024
SB10	27879	28079	25924	29842	26024	30042
SB11	31805	32005	29842	32892	30042	33092
SB12	33978	34178	32892	33978	33092	34178

Figura 54 Sottostazioni e zone alimentate

Le progressive di allacciamento sono quelle progressive dove le sottostazioni si collegano alla linea, mentre quelle di alimentazione sono le progressive indicanti i limiti di pertinenza di ogni sottostazione.

Una volta inseriti tutti questi dati su OpenTrack si ottiene il seguente modello.

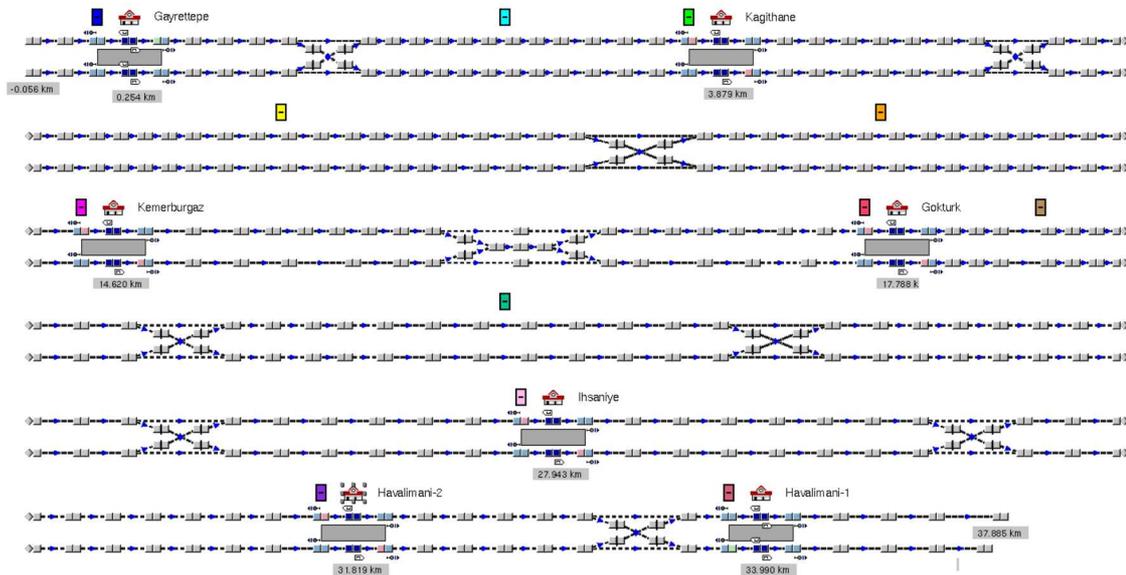


Figura 55 Tracciato progetto definitivo modellizzato su OpenTrack

Le icone del tipo , indicano le sottostazioni di alimentazione.

Nella figura seguente sono messe in evidenza con colori diversi le tratte di tracciato alimentate da ogni sottostazione.

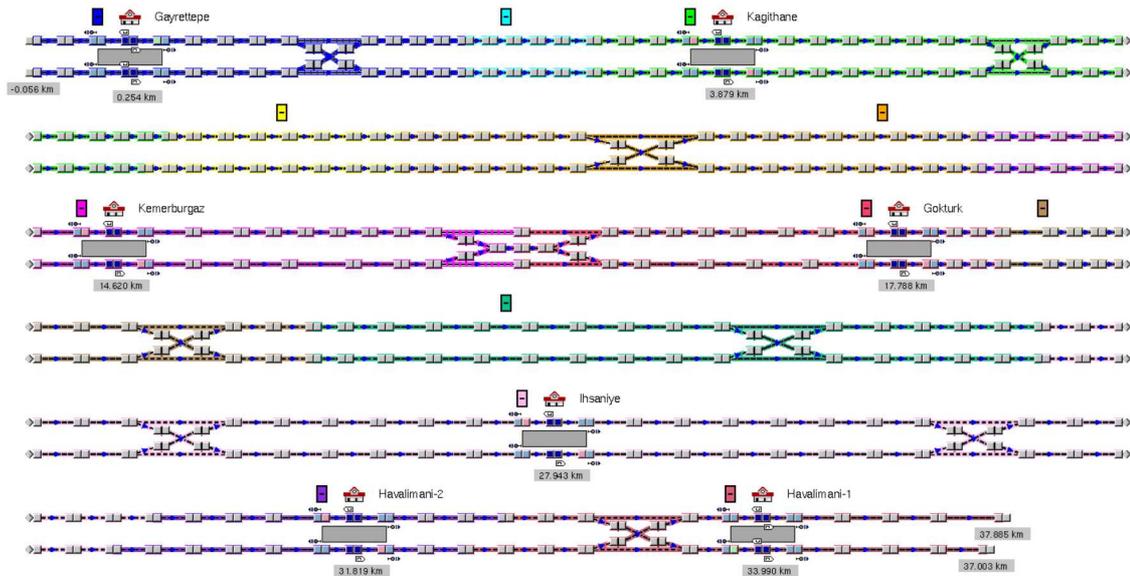


Figura 56 Zone di pertinenza delle sottostazioni

3.2.3 Inserimento dati di input del materiale rotabile

Per definire meglio il materiale rotabile utilizzato nelle simulazioni ci si basa sui dati forniti dallo studio di ingegneria Yüksel Proje riportati in precedenza.

Le curve di trazione fornite in particolare riguardavano un singolo vagone. Un treno è composto da 2 set di 4 veicoli (in tutto 8 veicoli), i quali collaborano tutti alla trazione agendo da locomotori ed hanno tutti le stesse caratteristiche.

I valori di trazione dei singoli veicoli possono quindi essere moltiplicati per 4, per ottenere i valori di trazione di un set (4 veicoli).

Si ottiene così la seguente curva di trazione.

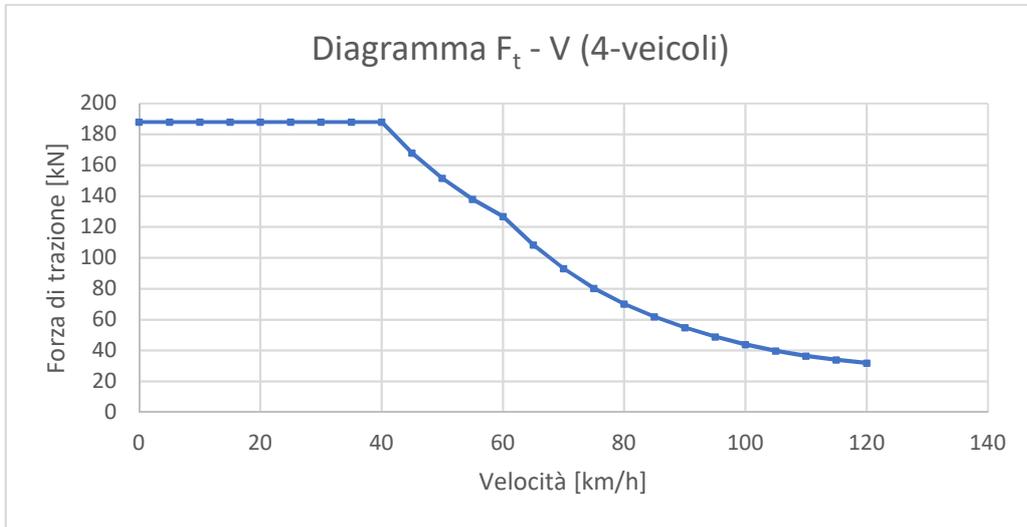


Figura 57 Curva F_t -V

Come si può osservare dal grafico si ha una prima fase nella quale i veicoli accelerano ai limiti dell'aderenza fino ai 40 km/h. Da 40 km/h fino a 60 km/h si ha una fase a potenza costante pari a circa 2'100 kW. Da 60 km/h fino a 120 km/h si ha invece un decadimento di potenza.

I valori riportati vengono importati in OpenTrack tramite l'apposita funzione.

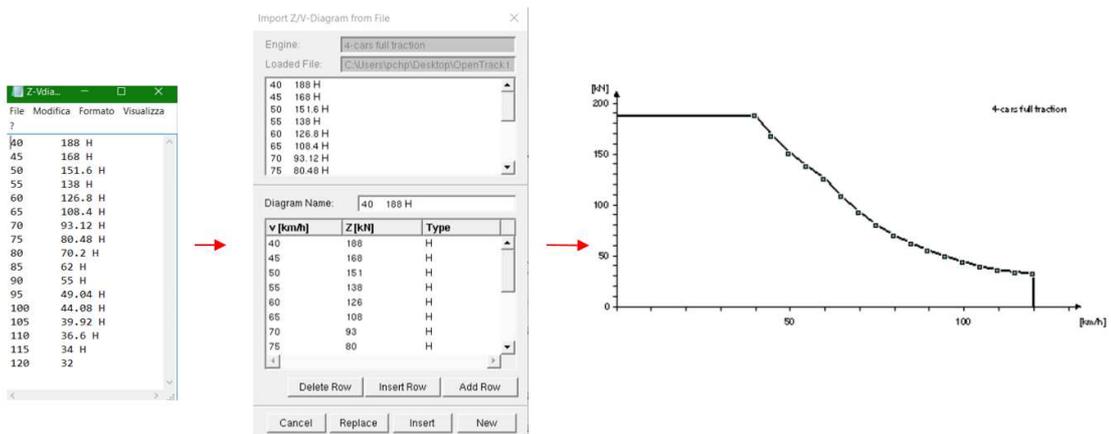


Figura 58 Modellazione delle forze di trazione

Si inseriscono quindi gli altri dati relativi alle caratteristiche dei treni nella finestra “Engines”, il set da 4 veicoli viene chiamato “4 cars (MTTM-power loss)”.

The screenshot shows the 'Engines' window with the following configuration:

- Engine: 4 car (MTTM-power loss) 5 / 11
- Engine Name: 4 car (MTTM-power loss)
- Load [t]: 212 Resistance Factor: 3.30
- Adh. Load [t]: 106 Rot. mass Factor: 1.10
- Length [m]: 90 Balise Telegram
- Speed max. [km/h]: 120 Loop Telegram
- Tractive Effort max. [kN]: 189 Radio Telegram
- Rack Traction
- Z/V-Diagrams: No
- System: DC 1500 V (selected)
- Adhesion [%]: bad: 80 normal: 125 good: 150
- Visual Rectangle: Speed max. [km/h]: 121 Tractive Effort max. [kN]: 200 Min. [kN]: 0

Figura 59 Dati "engines"

Si ha un carico (Load) di 212 t pari a 53 t (AW3) moltiplicato per 4 (4 veicoli per ogni set). Si ipotizza che la metà del peso sia aderente, si imposta la lunghezza di 90 m (metà treno) e la massa rotante 1.1 (10% di massa rotante). L'alimentazione elettrica è invece a CC (DC in inglese) e a 1500 Volt.

Il sistema di posizionamento invece si imposta con loop, balise e radio, per permettere l'utilizzo del blocco mobile, per il quale è necessario il posizionamento in continuo del treno e la comunicazione in continuo treno-terra.

Una volta definito il set è necessario definire il treno tramite la finestra apposta.

The screenshot shows the 'Trains - Edit' window with the following configuration:

- Train Name:** 8 car (2*MTTM-power loss)
- Description:** (empty)
- Type:** Commuter / Regio Train
- Category:** Category 1
- Engines:**

Pos.	Name	Load [t]	Len. [m]
1	4 car (MTTM-power loss)	2 12	90
2	4 car (MTTM-power loss)	2 12	90

Σ Load [t]: 424 Σ Len. [m]: 180
- Trailers:** (empty table)
- Resistance Equation:**
 - Rolling:** Davis Formula $F = m \cdot g / 1000 \cdot (A + B \cdot v + C \cdot v^2)$
 - A:** 3.200 **B:** 0.0340 **C:** 0.00047 **Unit:** N
 - Starting Res. [N/t]: below Speed [km/h]:
 - Gradient:** Distributed Mass per Train
 - Curve:** Roeckl Formula Standard Gauge (Trains) [%]: 100.0
- Acceleration (Train related Settings):**
 - Max. Acceleration [m/s²]:** 0.80 Max. Drawbar Force [kN]:
 - Acc. Delay [s]:** 0 Min. Time to hold Speed [s]:
 - Acc. Delay at Stop [s]:** 0
- Deceleration:**
 - Deceleration Function:** Default

From [km/h]	To [km/h]	Dec. [m/s ²]
0	v max.	-1.00
- Braked Weight Percentage (BWP) [%]:** 100
- a = -(C1+C2*BWP)** C1: C2: **Result [m/s²]:**
- Correct Deceleration on Gradients [m/s²/‰]** 0.010
- Min. Dec. [m/s²]:** -0.10 **Max. [m/s²]:** -1.00
- Default** **Dec. Delay [s]:** **above [km/h]:**

Figura 60 Dati treno

I treni sono composti da due set (2x4 veicoli).

Per le resistenze ordinarie si utilizza la formula di Davis, nella quale si inseriscono i coefficienti relativi alle metropolitane (Borisowsky). I veicoli metropolitani sono infatti caratterizzati da una minore aerodinamicità dei mezzi ed hanno quindi una resistenza maggiore a velocità elevate.

La resistenza al moto per le metropolitane è calcolabile tramite la seguente formula (i coefficienti riportati sono utilizzati in diverse linee metropolitane, vedi metropolitana di Catania [8]).

$$R_{ord} = \frac{3.2 + 0.034 \cdot v + 0.00047 \cdot v^2}{1000} \cdot P \quad [N]$$

Si utilizza invece la formula di Roeckl con scartamento standard (1435 mm) per la resistenza in curva.

$$R_c = \frac{6.3}{r - 55} \cdot m \quad [N] \quad \text{for } r \geq 300 \text{ metri}$$
$$R_c = \frac{4.91}{r - 30} \cdot m \quad [N] \quad \text{for } r < 300 \text{ metri}$$

Dove m è la massa del treno, mentre r è il raggio della curva.

Si inseriscono quindi i valori limite di accelerazione e decelerazione imposti per la linea, pari rispettivamente a $0,8 \text{ m/s}^2$ e 1 m/s^2 .

Per quanto riguarda la frenatura, OpenTrack non permette di definire una curva relativa allo sforzo frenante (come invece avviene per la trazione), ma stabilisce unicamente dei valori fissi di decelerazione nei vari intervalli di velocità impostati. Nel caso in esame si considera un unico intervallo di velocità (da 0 a v_{\max}), per il quale si imposta una decelerazione di $0,8 \text{ m/s}^2$. I valori di decelerazione verranno quindi usati dal programma per calcolare i profili di frenatura lungo la linea.

Diverso è il discorso per quanto riguarda le accelerazioni. OpenTrack calcola l'accelerazione istante per istante lungo il tracciato, in funzione delle forze di trazione definite in precedenza nelle curve di trazione degli "engines", delle resistenze e della massa del treno secondo la formula seguente.

$$a_1 = \frac{F - R}{m} \quad [m/s^2]$$

Una volta calcolate le accelerazioni OpenTrack confronta i valori ottenuti con quello limite impostato ($a_2 = 0,8 \frac{m}{s^2}$) e assume il valore minimo tra i due per la definizione dei profili di accelerazione lungo la linea.

$$a = \min \left\{ \begin{matrix} a_1 \\ a_2 \end{matrix} \right\} \quad [m/s^2]$$

3.3 SIMULAZIONI

Si svolgono diverse simulazioni:

- in primo luogo si simula la marcia di un singolo treno in transito sulla linea 1 (Gayrettepe – Havalimani-1) per definire se le ipotesi riguardanti il materiale rotabile (in particolare le formule delle resistenze e le curve di trazione) siano o meno conformi a quelle del progetto definitivo;
- quindi si simula la marcia dei singoli treni in entrambe le direzioni e le condizioni del tracciato negli orari di punta, con frequenza 5 minuti come da progetto definitivo;
- infine si svolgono le simulazioni non più con frequenza 5 minuti ma 3 minuti, distanziamento che sarà poi quello da impiegare per linea nel progetto esecutivo.

3.3.1 Verifica dei dati di input

I risultati forniti in termini di tempo di spostamento, velocità commerciale e grafico distanza/velocità sono i seguenti.

Stazione partenza	Stazione di arrivo	Tempo di viaggio	Velocità commerciale
[-]	[-]	[mm:ss]	[km/h]
Gayrettepe	Havalimani-1	24:49	81.64

Figura 61 Risultati simulazioni Yüksel Proje (t, v_{comm})

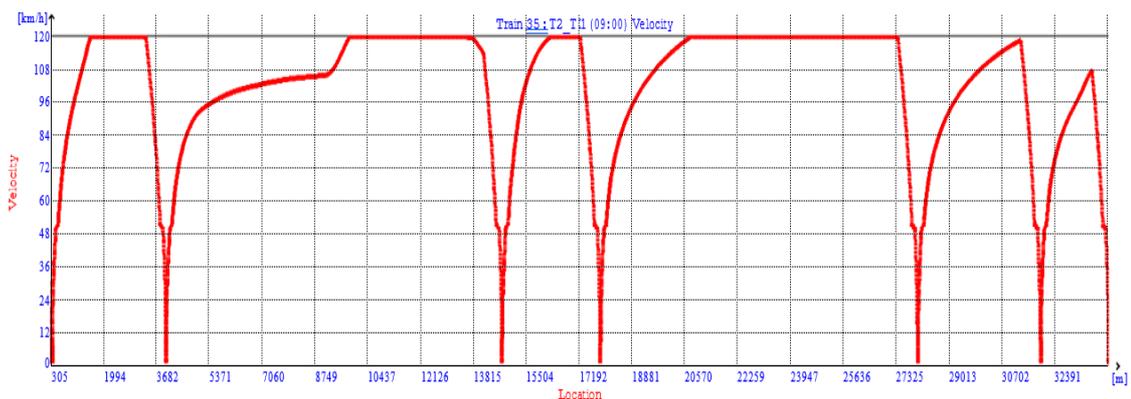


Figura 62 Diagramma v/d Yüksel Proje (L1)

Si vuole ora trovare un modello che fornisca dei risultati analoghi.

Si imposta l'itinerario su OpenTrack per la linea L1.

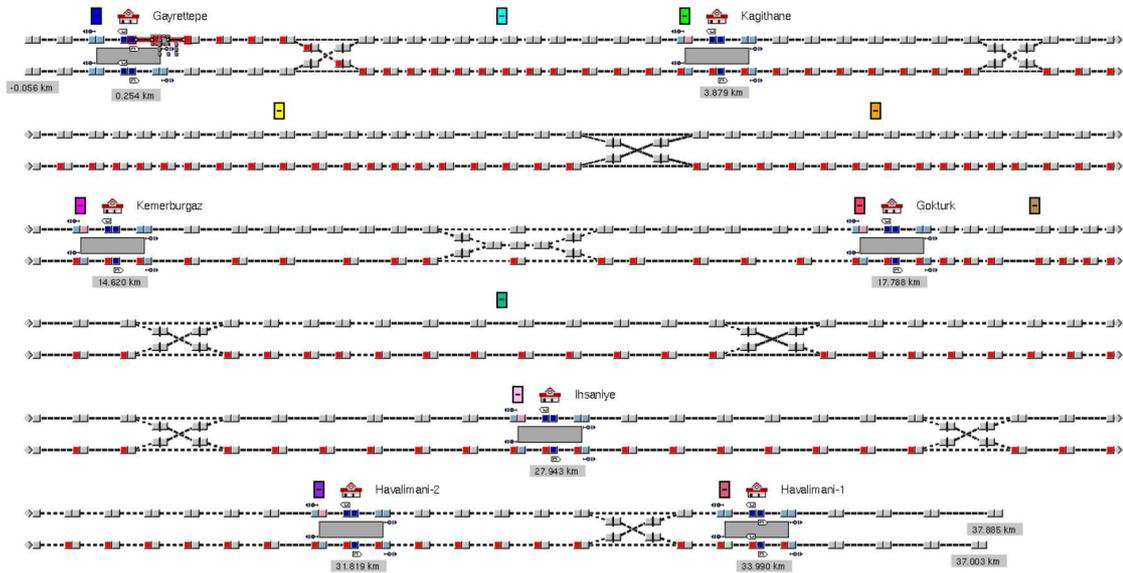


Figura 63 Itinerario Gayrettepe - Havalimani-1 (G-H)

Si definisce la corsa e la relativa tabella oraria.

Nella tabella oraria si definiscono solo gli orari di partenza dei treni nella prima stazione ed i tempi di sosta in tutte le sottostazioni, lasciando OpenTrack libero di calcolare gli effettivi orari di arrivo e di partenza nelle varie fermate.

La corsa viene denominata set 1.

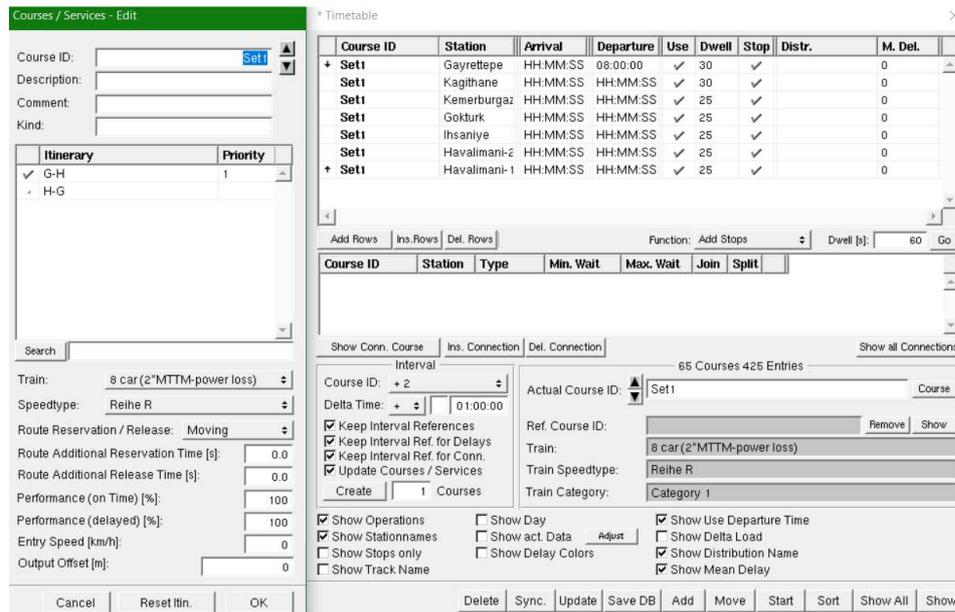


Figura 64 Course (corsa) e timetable (tabella oraria)

Si lancia ora la simulazione con performance al 100% e si ottengono i seguenti risultati.

Stazione partenza	Stazione di arrivo	Tempo di viaggio	Velocità commerciale
[-]	[-]	[mm:ss]	[km/h]
Gayrettepe	Havalimani-1	26:48	75.53

Figura 65 Risultati simulazioni set 1 (t, v_{comm})

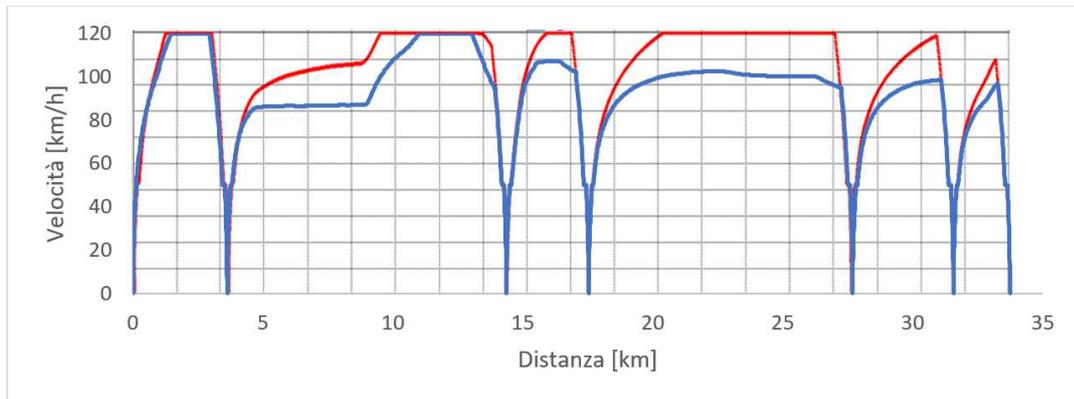


Figura 66 Diagramma v/d: set 1 (in blu), progetto definitivo (in rosso)

Come si può osservare le prestazioni del materiale rotabile del set 1 sono nettamente inferiori rispetto a quelle indicate nel progetto definitivo e i risultati differiscono in maniera piuttosto rilevante. Questo può essere dovuto al fatto di aver utilizzato una curva di trazione con prestazioni

minori di quelle usate nel progetto definitivo. Si ipotizza infatti, che per le simulazioni svolte nel progetto definitivo non si fosse tenuto conto di un decadimento di potenza per velocità elevate, ma si fosse semplicemente considerata una potenza costante sopra ai 40 km/h.

Osservando i dati riguardanti le forze di trazione è possibile risalire alle potenze installate su ogni “engine” (gruppo di 4 veicoli).

Dai valori della trazione stimati dal grafico F_t/v del progetto definitivo si calcola:

$$P = v \cdot F_t \quad [kW]$$

dove v è espresso in [m/s] e F_t in [N]

Se si mantiene fissa la potenza al valore massimo stimato si ottiene un nuovo diagramma di trazione, che può essere impiegato per le simulazioni al fine di ottenere dei risultati più aderenti a quelli del progetto definitivo.

v	Vecchia curva Ft/v			Nuova curva Ft/v	
	Ft	P		P	Ft
[km/h]	[kN]	[kW]		[kW]	[kN]
0	188	0		0	188
5	188	261		261	188
10	188	522		522	188
15	188	783		783	188
20	188	1044		1044	188
25	188	1306		1306	188
30	188	1567		1567	188
35	188	1828		1828	188
40	188	2089		2100	189
45	168	2100		2100	168
50	152	2106	-> P = 2100 kW	2100	151
55	138	2108		2100	137
60	127	2113		2100	126
65	108	1957		2100	116
70	93	1811		2100	108
75	80	1677		2100	101
80	70	1560		2100	95
85	62	1464		2100	89
90	55	1375		2100	84
95	49	1294		2100	80
100	44	1224		2100	76
105	40	1164		2100	72
110	37	1118		2100	69
115	34	1086		2100	66
120	32	1067		2100	63

Figura 67 Passaggio da potenza decrescente a potenza costante

Si crea quindi un nuovo input per la simulazione chiamato set2, all'interno del quale tutte le caratteristiche rimangono invariate ad eccezione della curva di trazione, che viene modificata utilizzando una potenza fissa di 2100 kW dai 40 km/h in su.

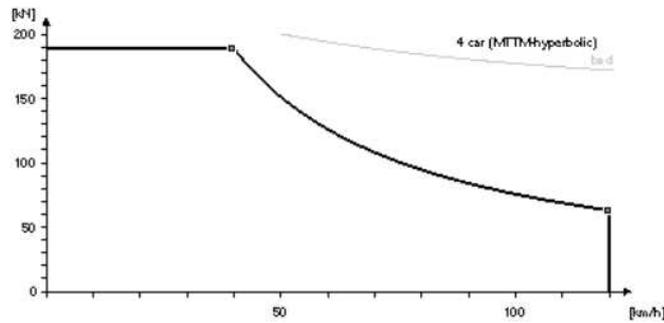


Figura 68 Curva F/v a potenza costante

Si rilancia la simulazione per confrontare i risultati con quelli ottenuti in precedenza e verificare se si è avuta una migliore aderenza alle simulazioni del progetto definitivo.

Stazione partenza	Stazione di arrivo	Tempo di viaggio	Velocità commerciale
[-]	[-]	[mm:ss]	[km/h]
Gayrettepe	Havalimani-1	24:51	81.46

Figura 69 Risultati simulazioni set 2 (t, v_{comm})

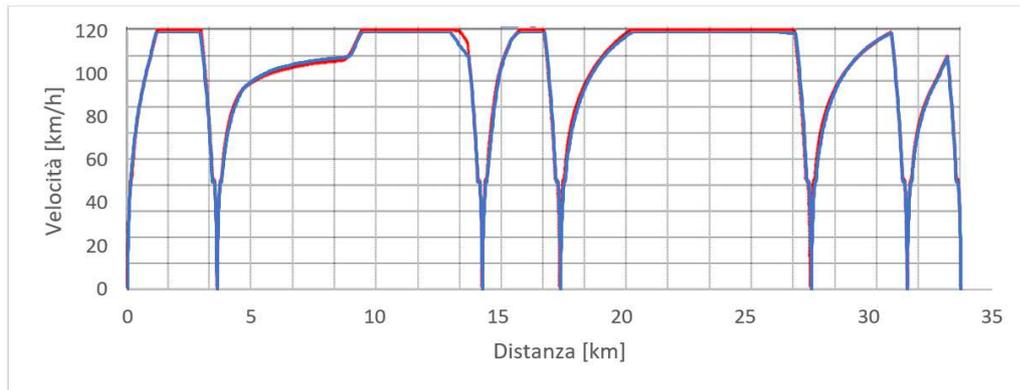


Figura 70 Diagramma v/d : set 2 (in blu) progetto definitivo (in rosso)

Come si può già osservare i risultati sono molto più simili a quelli del progetto definitivo. I tempi di percorrenza sono ancora leggermente più lunghi e si potrebbe pensare di applicare qualche altro accorgimento, ma il risultato risulta già di per sé soddisfacente.

Si hanno infatti unicamente 2 secondi in più nei tempi di percorrenza, differenza che può essere dovuta alle diverse ipotesi di funzionamento dei due programmi di calcolo utilizzati.

Un ulteriore cambiamento che si potrebbe pensare è l'utilizzo dei coefficienti standard utilizzati in ferrovia (preimpostati nel programma) per il calcolo delle resistenze ordinarie. Si definisce

quindi un terzo set di dati di input (set3) dove tutte le caratteristiche sono uguali al set2 tranne la formula delle resistenze.

In questo caso la formula che si utilizza per il calcolo della resistenza ordinaria è la seguente (i valori cambiano in quanto si considera una migliore aerodinamicità dei mezzi).

$$R_{ord} = \frac{1.5 + 0.003 \cdot v + 0.00085 \cdot v^2}{1000} \cdot P \quad [N]$$

Dalle simulazioni si ottengono i seguenti risultati.

Stazione partenza	Stazione di arrivo	Tempo di viaggio	Velocità commerciale
[-]	[-]	[mm:ss]	[km/h]
Gayrettepe	Havalimani-1	24:43	81.89

Figura 71 Risultati simulazioni set 3 (t, v_{comm})

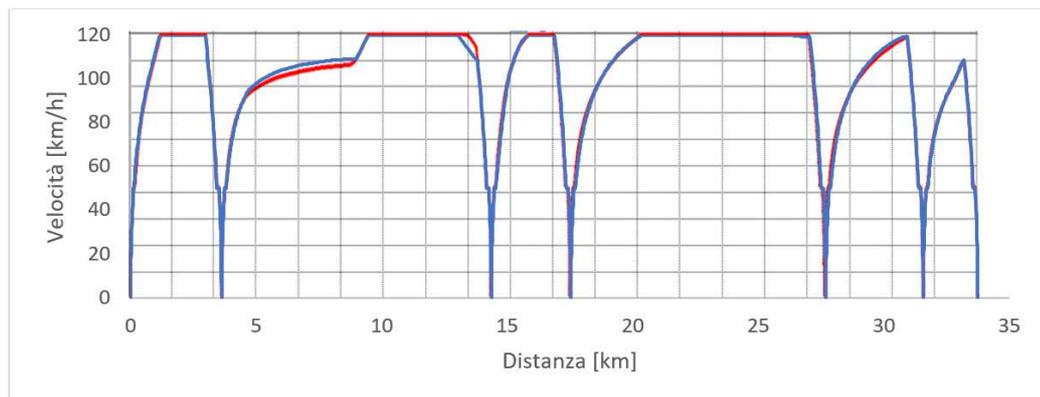


Figura 72 Diagramma v/d: set 3 (in blu) progetto definitivo (in rosso)

Anche in questo caso si rimane molto aderenti ai tempi di percorrenza del progetto definitivo, con unicamente 6 secondi in meno, per via delle minori resistenze aerodinamiche considerate.

Nella formula della resistenza ordinaria al moto infatti si considerano dei veicoli ferroviari standard, e quindi caratterizzati da aerodinamicità maggiori (minori resistenze).

Data la maggiore correttezza dei valori di resistenza utilizzati nel set 2 (resistenze ordinarie per metropolitane e non per treni tradizionali) e la minor differenza rispetto ai risultati del progetto definitivo, si sceglie di utilizzare per le prossime simulazioni il set 2.

3.3.2 Marcia treni e simulazioni con frequenza 5 minuti

Si analizzano ora i principali output delle simulazioni nei due sensi di marcia.

Utilizzando i dati di input del set2 si creano una serie di corse intervallate tra loro di 5min (300 secondi). Le corse vengono chiamate 1001, 1002, 1003, ...ecc. nella linea 1 e 2001, 2002, 2003, ...ecc. nella linea 2.

Le simulazioni non sono più al 100% della performance, valore che nella realtà non è possibile raggiungere, ma al 95%.

Per semplificare le operazioni di simulazione si fanno partire le corse solo da Gayrettepe e, quando il primo treno arriva all'aeroporto, si fa ripartire lo stesso treno dall'aeroporto per tornare indietro percorrendo la linea 2. Il treno 1001 coinciderà in questo modo con il treno 2001.

Si modificano quindi i tempi di inversione nelle due stazioni terminali fino ad ottenere una linea senza conflitti tra i treni nelle stazioni terminali e tale da garantire sempre un distanziamento temporale tra i treni pari a 5 min.

Dapprima si analizzano i risultati relativi alle singole corse nelle due direzioni.

Linea 1						
Stazione	t_arrivo	t_partenza	t_sosta	Stazioni		t_interstazione
[-]	[mm:ss]	[mm:ss]	[mm:ss]	[-]		[mm:ss]
Gayrettepe	-	00:00	-	Havalimani-1	Havalimani-2	03:15
Kagithane	03:15	03:45	00:30	Havalimani-2	Ihaniye	06:49
Kemberburgaz	10:34	10:59	00:25	Ihaniye	Gokturk	02:30
Gokturk	13:29	13:54	00:25	Gokturk	Kemberburgaz	06:18
Ihaniye	20:12	20:37	00:25	Kemberburgaz	Kagithane	03:01
Havalimani-2	23:38	24:03	00:25	Kagithane	Gayrettepe	02:05
Havalimani-1	26:08	-	-			

Figura 73 Tabelle orarie L1

Linea 2

Stazione	t_arrivo	t_partenza	t_sosta	Stazioni		t_interstazione
[-]	[mm:ss]	[mm:ss]	[mm:ss]	[-]		[mm:ss]
Havalimani-1	-	00:00	-	Havalimani-1	Havalimani-2	02:21
Havalimani-2	02:21	02:46	00:25	Havalimani-2	Ihaniye	02:57
Ihaniye	05:43	06:08	00:25	Ihaniye	Gokturk	06:14
Gokturk	12:22	12:47	00:25	Gokturk	Kemberburgaz	02:34
Kemberburgaz	15:21	15:46	00:25	Kemberburgaz	Kagithane	06:35
Kagithane	22:21	22:51	00:30	Kagithane	Gayrettepe	03:17
Gayrettepe	26:08	-	-			

Figura 74 Tabelle orarie L2

I tempi di percorrenza e le lunghezze totali sono gli stessi per ambo le linee, di conseguenza anche le velocità commerciali saranno identiche.

Tempo	Lunghezza	Velocità comm.
[mm:ss]	[km]	[km/h]
26:08	33.741	77.47

Figura 75 Caratteristiche L1 e L2

Unendo i dati delle due direzioni di marcia si ottiene quindi il seguente tempo giro e la seguente velocità media.

Tempo inversione		Tempo giro	Lunghezza	Velocità media
Havalimani-1	Gayrettepe			
[mm:ss]	[mm:ss]	[mm:ss]	[km]	[km/h]
01:14	01:30	55:00	67.482	73.62

Figura 76 Dati relativi al giro completo

Le soste dovrebbero essere pari a 25 secondi ad Havalimani-1 e a 30 secondi a Gayrettepe (valori medi). Si ha quindi un disavanzo di rispettivamente 49 s e 60 s, per un totale di 1m49s. Questo tempo di “scorta” può essere utilizzato per recuperare eventuali ritardi dei treni e può essere distribuito tra le due stazioni terminali o eventualmente in tutte le stazioni, per avere una gestione più stabile della linea.

Si riportano i grafici di velocità nelle due direzioni di marcia.

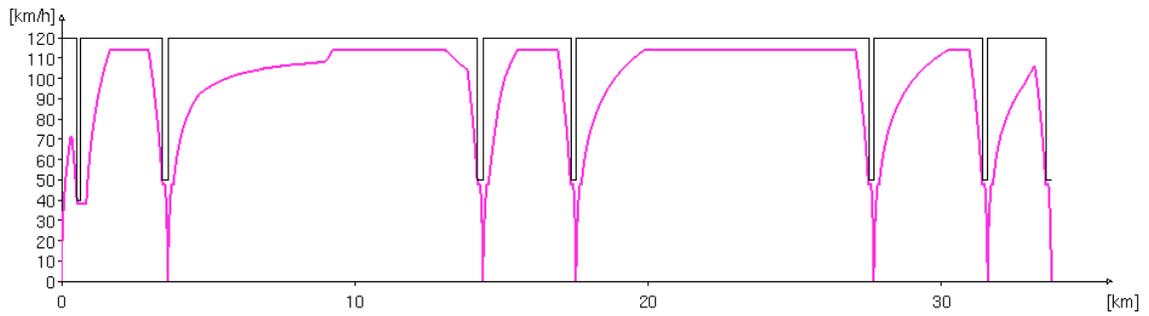


Figura 77 Grafico v/d (L1)

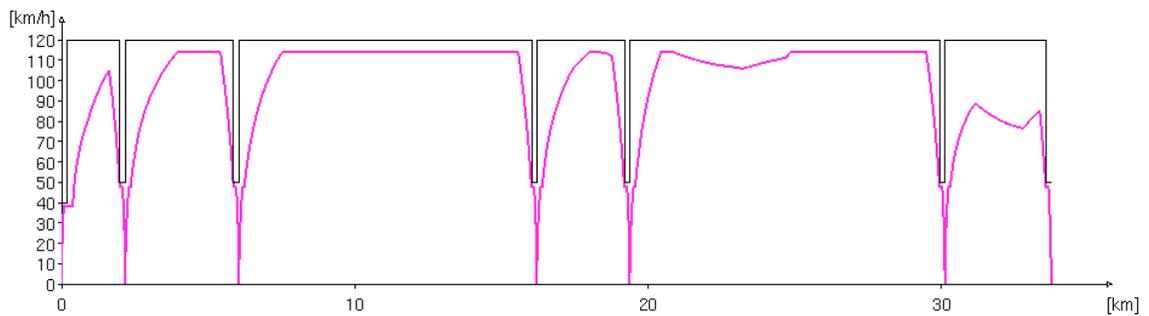


Figura 78 Grafico v/d (L2)

Si elabora quindi il “train diagram” ovvero l’orario grafico tramite l’apposita finestra.

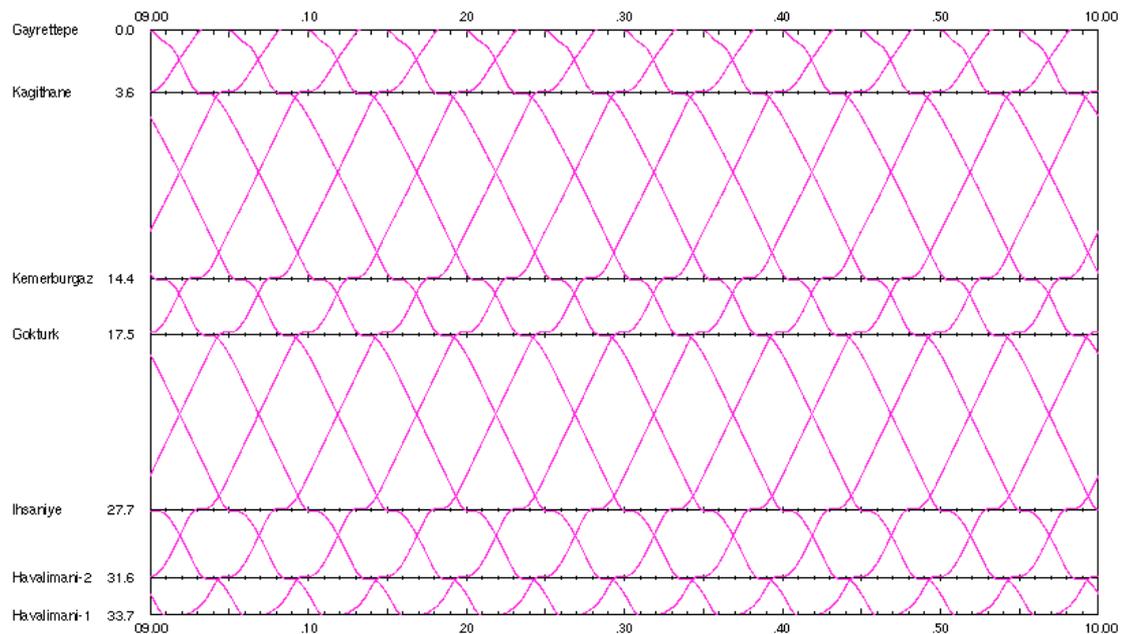


Figura 79 Orario grafico (treni ogni 5 minuti)

Il numero minimo di treni necessari per operare sulla linea con un distanziamento tra i treni di 5 minuti è 11 treni.

Analizzando quelle che sono le capienze massime dei treni per condizioni di riempimento AW2 (4 pers/m²) e AW3 (6 pers/m²) è possibile risalire alle capacità della linea.

	Passeggeri/m ² [1/m ²]	Area [m ²]	Passeggeri/Veicolo [-]	Veicoli/Treno [-]	Passeggeri/Treno [-]
AW2	4	14	56	8	448
AW3	6		84		672

Figura 80 Calcolo passeggeri/treno (AW2 e AW3)

Distanziamento [s]	Treni/ora [1/h]	n° treni [-]	PHD (AW2) [1/h]	PHD (AW3) [1/h]
300	12	11	5376	8064

Figura 81 Passeggeri per ora per direzione di marcia (treni ogni 5 min)

Un altro importante dato utile che si può ottenere dalle simulazioni è quello riguardante i consumi elettrici della linea.

OpenTrack fornisce i dati di consumo dei singoli treni nel tempo, i quali risultati sono visibili qui di seguito.

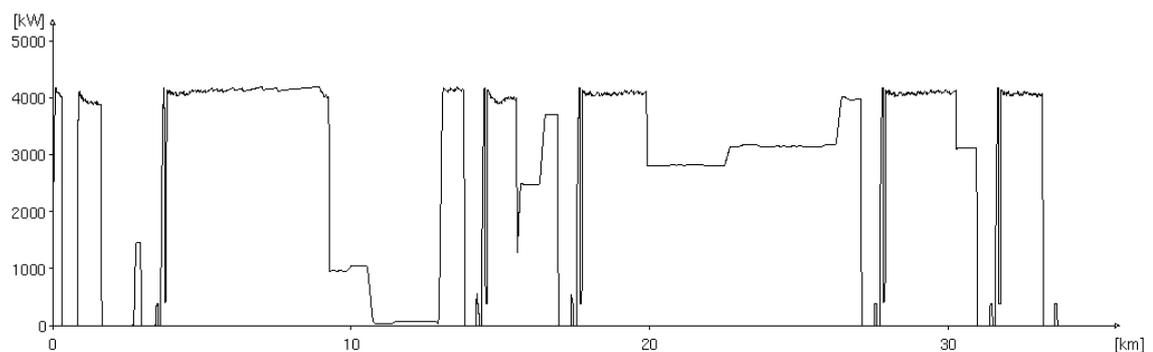


Figura 82 Consumi trazione treno singolo (L1)

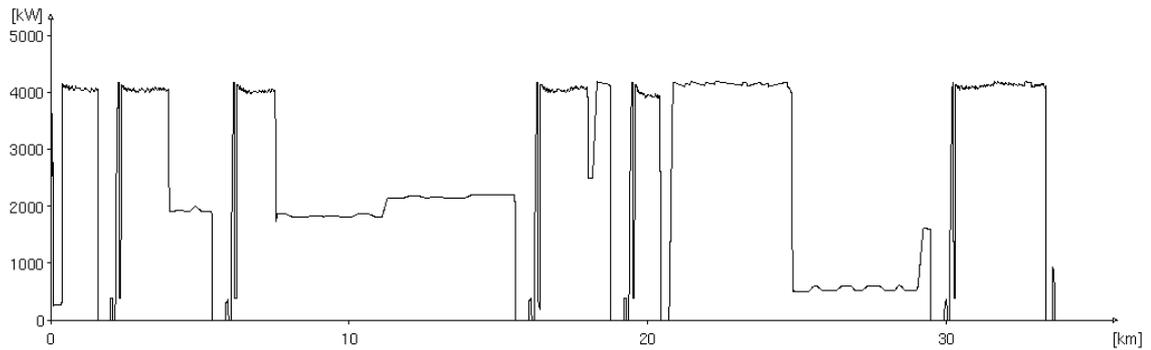


Figura 83 Consumi trazione treno singolo (L2)

La potenza massima consumata da un treno si aggira quindi su valori di circa 4000kW.

OpenTrack fornisce anche i dati relativi alle potenze meccaniche richieste alle varie sottostazioni nel tempo.

Ciò che si ottiene nel momento in cui la linea è completamente occupata (nelle simulazioni si considera l'intervallo di tempo dalle 9 alle 10, vedi grafico orario) è una ripetizione ciclica ogni 5 minuti dei consumi sulla linea nelle varie sottostazioni.

Le potenze presenti nei grafici precedenti e quelle consumate dalle sottostazioni sono però potenze meccaniche.

Per ricavare le rispettive potenze elettriche è necessario considerare il rendimento del sistema di alimentazione e dei motori e le potenze ausiliarie richieste per luci, apertura/chiusura porte, condizionamento dell'aria e in generale tutte quelle operazioni dove è necessaria la fornitura di energia elettrica.

Per quanto riguarda il rendimento si assume un valore pari al 92%, mentre per i consumi ausiliari si utilizza il valore indicato nel progetto definitivo di 200kW per treno.

Per il calcolo della potenza elettrica richiesta ad ogni sottostazione è quindi necessario conoscere il numero dei treni (11) e il numero delle sottostazioni di alimentazione (12). Il calcolo fatto è il seguente.

$$P_{el} = \frac{P_{mech}}{0.92} + P_{aux} \cdot \frac{n_{treni}}{n_{sottostazioni}} \quad [kW]$$

Nei grafici seguente si riportano i consumi elettrici relativi ad un ciclo di durata 5 minuti.

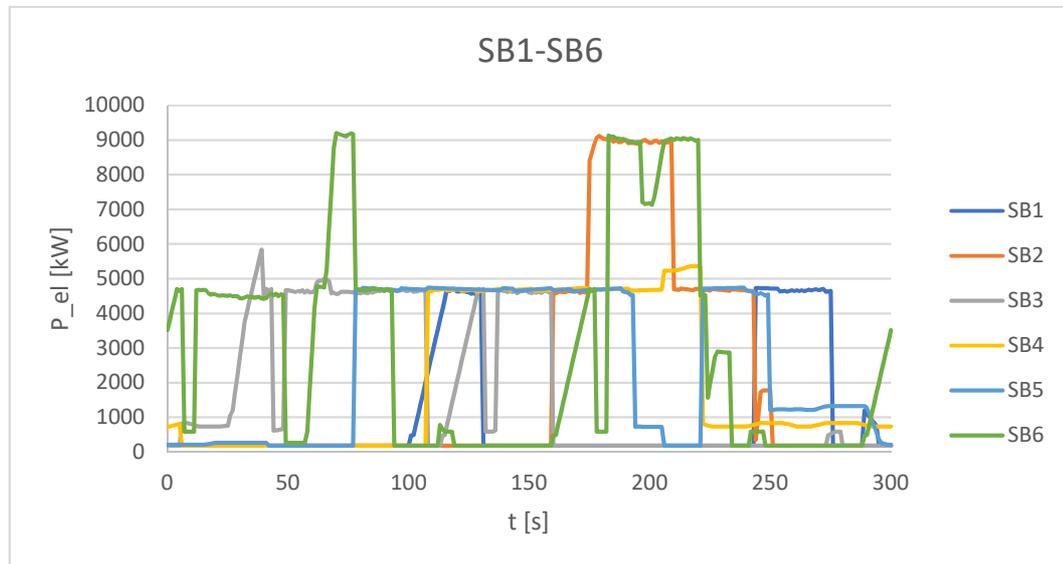


Figura 84 Consumi elettrici SB1-SB6

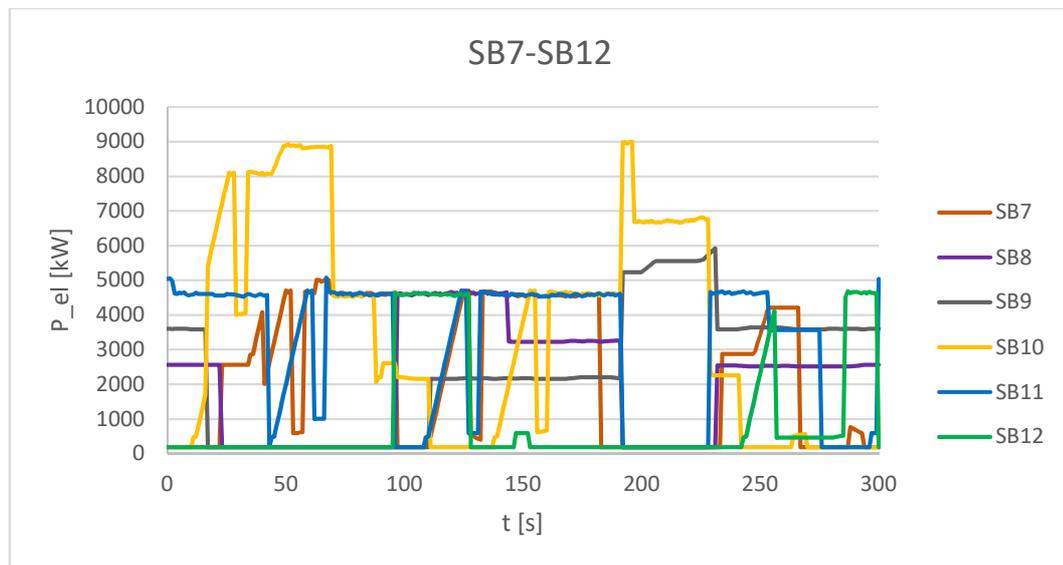


Figura 85 Consumi elettrici SB7-SB12

Nelle seguenti tabelle si riepilogano i dati di consumo massimi medi e minimi nelle varie sottostazioni, con le rispettive lunghezze alimentate da ogni sottostazione.

Sottostazione	Pmax	Pmed	Pmin	Lungh. Alimentata
[-]	[kW]	[kW]	[kW]	[m]
SB1	4734	1005	183	1230
SB2	9122	1960	183	1820
SB3	5843	1831	183	2450
SB4	5358	2088	183	3225
SB5	4742	2525	183	3820.5
SB6	9205	2916	183	3715.5
SB7	5018	2328	183	2629.5
SB8	4673	2082	183	3068.5
SB9	5924	2402	183	4014.5
SB10	9000	3514	183	3968.5
SB11	5080	3084	183	3049.5
SB12	4689	988	183	1086.5

Figura 86 Potenze elettriche media, massima e minima nelle sottostazioni

Le sottostazioni di alimentazione sono equipaggiate di 2 unità di alimentazione da 3 MW l'una, per un totale di 6 MW forniti da ogni sottostazione.

Sono inoltre in grado di sostenere potenze fino al 150% in più delle potenze nominali (9MW) per periodi di tempo non superiori a 2 ore e potenze fino al 300% in più di quelle nominali (18MW) per periodi di tempo di massimo 60 secondi.

Nei grafici precedenti si può osservare come il limite di potenza di 6 MW sia superato dalle sottostazioni SB2, SB6 e SB10 fino a potenze di circa 9MW, per periodi di tempo non superiori ai 50 secondi. Le verifiche delle potenze nelle sottostazioni risultano quindi soddisfatte e non si hanno decadimenti nelle prestazioni dei treni.

3.3.3 Simulazioni con frequenza 3 minuti

Per il progetto esecutivo la committenza ha disposto che i distanziamenti tra i treni dovessero essere ridotti da 5 a 3 minuti (nelle ore di punta), questo per rispondere ad una richiesta di capacità aggiuntiva che si è ipotizzata per la linea.

A scopo di studio, una simulazione con distanziamento pari a 3 minuti viene fatta anche per la linea del progetto definitivo, in modo tale da avere un confronto tra le due simulazioni e

comprendere meglio i cambiamenti che implica una modifica della frequenza dei treni sul servizio ferroviario.

Tutti gli altri parametri vengono mantenuti costanti come nella simulazione precedente.

Le tabelle orarie rimarranno uguali come nel caso di distanziamento 5 minuti, mentre cambieranno i tempi di inversione e quindi anche il tempo giro (anche se non in modo rilevante).

Tempo inversione		Tempo giro	Lunghezza	Velocità media
Havalimani-1	Gayrettepe			
[mm:ss]	[mm:ss]	[mm:ss]	[km]	[km/h]
01:07	00:37	54:00	67.482	74.98

I tempi di inversione risultano diminuiti. Questo comporta un importante svantaggio sulla linea, ovvero che i tempi di “scorta” siano considerevolmente ridotti da 1m49s a 49s (42s ad Havalimani-1 e 7s a Gayrettepe).

Come conseguenza si ha che la linea risulta meno stabile ed è più difficile gestire eventuali ritardi dei treni nelle ore di punta.

Un altro cambiamento importante risulta essere il numero di treni necessari per garantire un servizio ogni 3 minuti, che risulta essere notevolmente maggiore, con conseguenti importanti costi per l’acquisto dei veicoli ed in futuro della loro manutenzione. I treni necessari a garantire il servizio saranno 18 e non più 11.

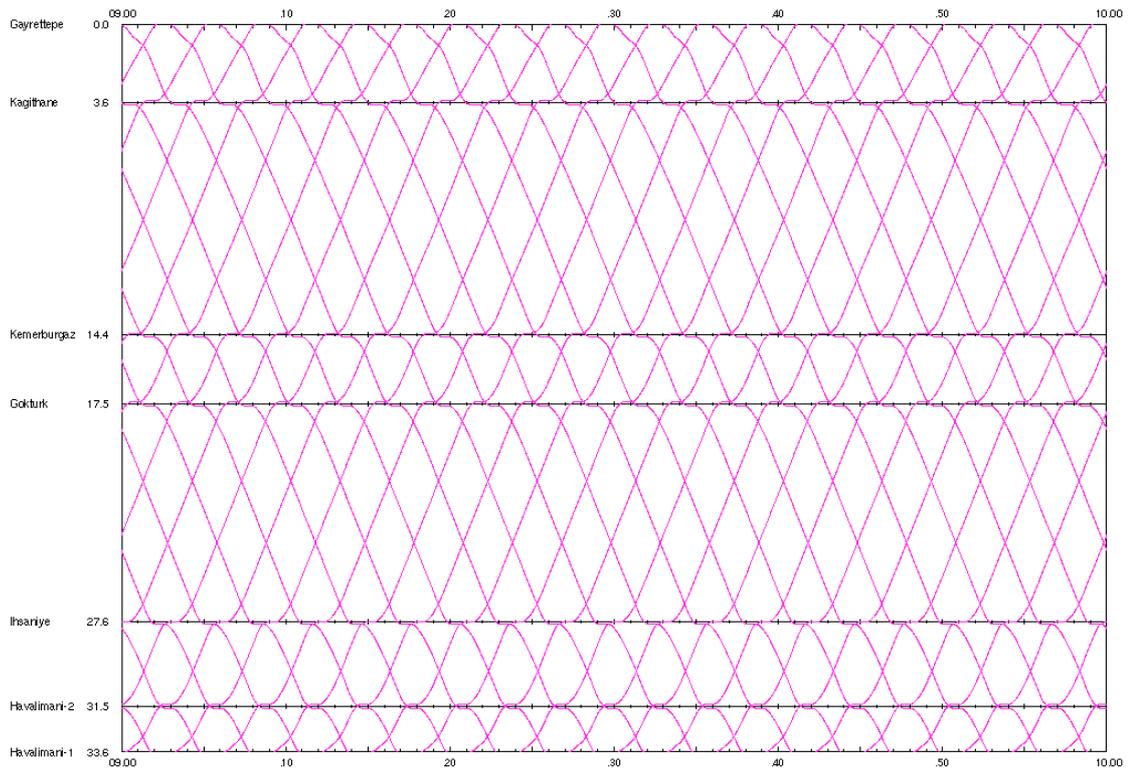


Figura 87 Orario grafico (treni ogni 3 minuti)

Cambiano quindi anche i passeggeri per ora per direzione di marcia, che risultano notevolmente incrementati, come si riporta nella seguente tabella. Si persegue così quello che è l'obiettivo della committenza in merito alle capacità di linea necessarie per le ore di punta.

Distanziamento	Treni/ora	n° treni	PHD (AW2)	PHD (AW3)
[s]	[1/h]	[-]	[1/h]	[1/h]
180	20	18	8960	13440

Figura 88 Passeggeri per ora per direzione di marcia (treni ogni 3 min)

L'aumento di treni presenti sulla linea aumenta chiaramente anche i consumi di energia elettrica nelle sottostazioni di alimentazione.

Come fatto per le simulazioni precedenti si riportano i dati riguardanti i consumi di un ciclo (questa volta di 3 minuti) e i valori di potenza massimi, medi e minimi nelle varie sottostazioni.

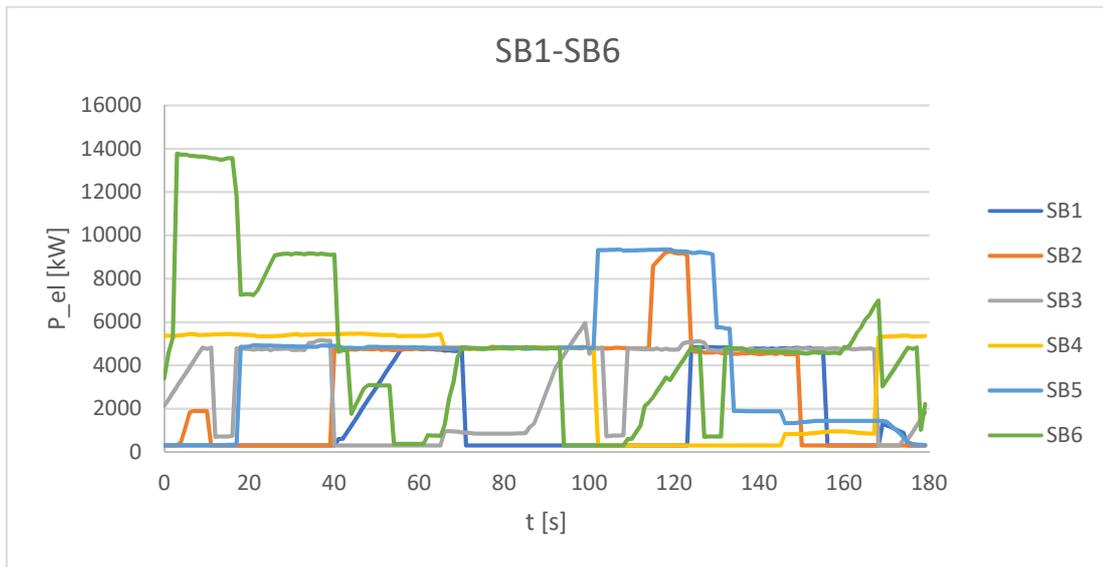


Figura 89 Consumi elettrici SB1-SB6

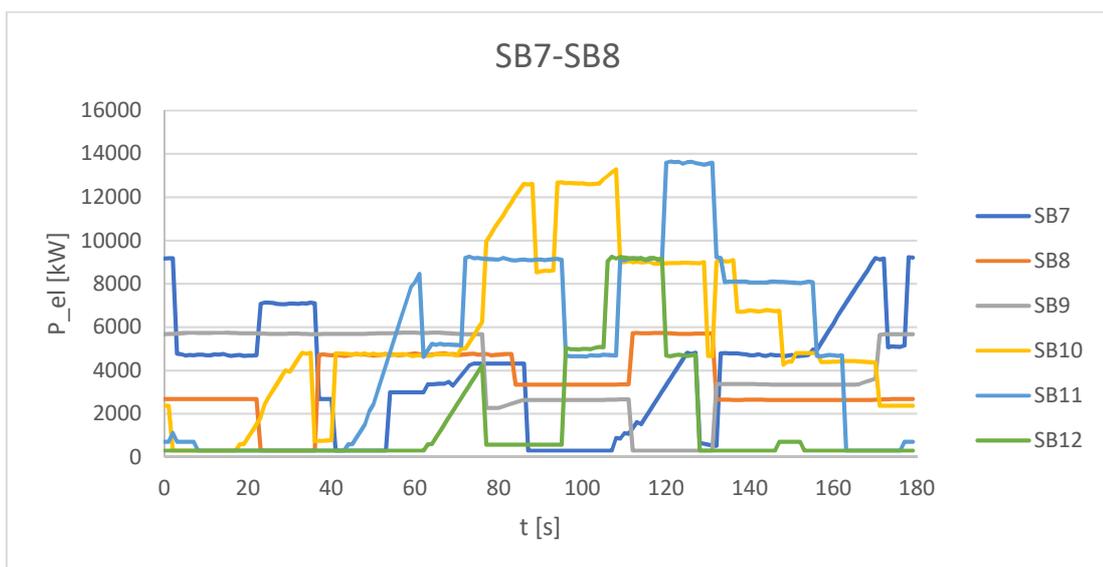


Figura 90 Consumi elettrici SB7-SB12

Sottostazione	Pmax	Pmed	Pmin	Lungh. Alimentata
[-]	[kW]	[kW]	[kW]	[m]
SB1	4850	1674	300	1230
SB2	9252	3272	300	1820
SB3	5960	3056	300	2450
SB4	5470	3482	300	3225
SB5	9362	4215	325	3821
SB6	13782	4852	300	3716
SB7	9231	3886	300	2630
SB8	5727	3462	300	3069
SB9	5743	3991	300	4015
SB10	13291	5869	300	3969
SB11	13648	5123	300	3050
SB12	9255	1645	300	1087

Figura 91 Potenze elettriche media, massima e minima nelle sottostazioni

Si può osservare come soprattutto nelle sottostazioni SB10 e SB11 si superi in più occasioni il limite di 6MW, ma il tempo in cui i valori sono superiori non è mai maggiore ai 60 secondi, anche se vi si avvicina considerevolmente. Per questo nel progetto esecutivo si prevede di aumentare il numero delle sottostazioni.

Sintetizzando quindi i pro e contro del cambio di frequenza dei treni si può dire quanto segue. Un aumento della frequenza del servizio è chiaramente percepito come un incremento nella qualità del servizio da parte dell'utente e permette di soddisfare flussi maggiori.

D'altro canto un servizio più frequente implica:

- costi maggiori per quanto riguarda alimentazione elettrica e il numero di mezzi;
- un servizio con una capacità minore di assorbire ritardi e quindi meno stabile.

4 MODELLAZIONE PROGETTO ESECUTIVO

Si passa ora alla modellazione del progetto esecutivo, che le autorità turche hanno commissionato allo studio di ingegneria Geodata S.p.A..

Il lavoro si divide in particolare nelle due seguenti fasi:

- dapprima si aggiornano i dati di input inserendo quelli del progetto esecutivo, elaborato dallo studio ingegneristico sopra citato;
- quindi si effettueranno le simulazioni in maniera analoga a quanto fatto per il progetto definitivo.

4.1 INSERIMENTO DATI DI INPUT

Come si è fatto nell'analisi del progetto definitivo si inseriscono in OpenTrack dapprima i dati relativi al tracciato e quindi quelli riguardanti il materiale rotabile.

4.1.1 Tracciato

Per quanto riguarda il tracciato si considerano prima di tutto i profili planimetrici e quelli altimetrici.

Per semplificare l'analisi al posto di considerare tracciati diversi per i due sensi di marcia si considera un unico tracciato, in quanto le due linee sono tra loro parallele e quindi i tracciati si equivalgono quasi completamente.

Un cambiamento importante rispetto al progetto definitivo è la fermata di Gayrettepe.

Gayrettepe è una stazione nella quale è già in servizio una linea metropolitana, la M2, che attraversa la città di Istanbul in parallelo allo Stretto del Bosforo. La linea del progetto definitivo parte da Gayrettepe perpendicolarmente alla stazione della linea M2.

Nel progetto esecutivo invece la nuova linea parte parallela alla linea esistente e prende poi la direzione dell'aeroporto. La stazione di Gayrettepe quindi non sarà più costruita da zero ma verrà ampliata la stazione già presente. Questo nuovo tracciato permette perciò di ridurre i costi di realizzazione della stazione di Gayrettepe, data la minore area di scavo. Inoltre, le banchine

previste per la linea di collegamento con l'aeroporto potranno in futuro essere utilizzate da una nuova linea che si prevede di realizzare e che passerà da Gayrettepe.

Si riportano alle pagine seguenti i tracciati planimetrici e altimetrici della linea.

Tracciato planimetrico				ID	Raggio	Progr. Inizio	Progr. Fine
ID	Raggio	Progr. Inizio	Progr. Fine	[-]	[m]	[m]	[m]
[-]	[m]	[m]	[m]				
1	0	0+000.00m	1+412.74m	38	1532	19+952.81m	20+479.11m
2	1032	1+412.74m	2+391.19m	39	0	20+479.11m	21+194.63m
3	0	2+391.19m	3+824.99m	40	1000	21+194.63m	21+786.00m
4	5000	3+824.99m	3+949.18m	41	0	21+786.00m	23+584.42m
5	0	3+949.18m	4+700.46m	42	1016	23+584.42m	24+015.47m
6	3000	4+700.46m	4+783.42m	43	0	24+015.47m	26+191.54m
7	0	4+783.42m	4+863.19m	44	1000	26+191.54m	26+905.79m
8	3000	4+863.19m	4+946.16m	45	0	26+905.79m	27+333.16m
9	0	4+946.16m	5+124.96m	46	766	27+333.16m	27+874.79m
10	2500	5+124.96m	5+180.53m	47	0	27+874.79m	28+105.38m
11	0	5+180.53m	5+446.41m	48	750	28+105.38m	28+233.07m
12	2500	5+446.41m	5+501.97m	49	0	28+233.07m	28+909.29m
13	0	5+501.97m	6+218.23m	50	750	28+909.29m	29+321.87m
14	1032	6+218.23m	6+456.26m	51	0	29+321.87m	29+794.43m
15	0	6+456.26m	6+883.28m	52	782	29+794.43m	30+091.66m
16	1032	6+883.28m	7+487.99m	53	0	30+091.66m	31+197.43m
17	0	7+487.99m	7+995.30m	54	1200	31+197.43m	31+977.32m
18	800	7+995.30m	8+432.97m	55	0	31+977.32m	32+744.39m
19	0	8+432.97m	8+928.19m	56	5000	32+744.39m	32+867.76m
20	819	8+928.19m	9+204.53m	57	0	32+867.76m	33+406.55m
21	0	9+204.53m	9+962.00m	58	5020	33+406.55m	33+530.41m
22	2500	9+962.00m	10+033.75m	59	0	33+530.41m	34+429.93m
23	0	10+033.75m	10+118.82m	60	2500	34+429.93m	34+527.18m
24	2500	10+118.82m	10+190.57m	61	0	34+527.18m	34+558.49m
25	0	10+190.57m	10+581.50m	62	2500	34+558.49m	34+655.74m
26	800	10+581.50m	11+174.38m	63	0	34+655.74m	35+146.96m
27	0	11+174.38m	12+935.48m	64	10000	35+146.96m	35+284.55m
28	832	12+935.48m	13+604.14m	65	0	35+284.55m	36+214.68m
29	0	13+604.14m	14+003.53m	66	10000	36+214.68m	36+352.27m
30	700	14+003.53m	14+570.47m	67	0	36+352.27m	36+911.81m
31	0	14+570.47m	14+786.36m	68	3000	36+911.81m	36+994.15m
32	720	14+786.36m	15+296.67m	69	0	36+994.15m	37+075.79m
33	0	15+296.67m	15+825.89m	70	3000	37+075.79m	37+158.13m
34	700	15+825.89m	16+504.55m	71	0	37+158.13m	37+488.93m
35	0	16+504.55m	17+252.85m	72	800	37+488.93m	38+840.68m
36	816	17+252.85m	17+633.79m	73	0	38+840.68m	42+834.27m
37	0	17+633.79m	19+952.81m	74	2500	42+834.27m	43+119.56m
				75	0	43+119.56m	43+286.89m

Figura 92 Tracciato planimetrico

Tracciato altimetrico			
ID	Progr. Inizio	Progr. Fine	Pendenza
[-]	[m]	[m]	[%]
1	-0+056.33m	0+115.00m	-0.25%
2	0+115.00m	0+432.24m	0.00%
3	0+432.24m	1+175.00m	-2.00%
4	1+175.00m	2+856.00m	-3.72%
5	2+856.00m	3+628.00m	-0.85%
6	3+628.00m	4+099.53m	0.00%
7	4+099.53m	4+584.79m	0.50%
8	4+584.79m	6+389.80m	1.90%
9	6+389.80m	8+671.73m	2.40%
10	8+671.73m	8+972.94m	1.00%
11	8+972.94m	9+347.61m	0.00%
12	9+347.61m	10+029.81m	-1.00%
13	10+029.81m	10+766.90m	-3.50%
14	10+766.90m	13+419.80m	-1.61%
15	13+419.80m	14+748.41m	0.50%
16	14+748.41m	15+172.21m	0.00%
17	15+172.21m	16+681.07m	0.75%
18	16+681.07m	17+458.54m	-0.50%
19	17+458.54m	18+297.98m	0.00%
20	18+297.98m	24+364.68m	0.50%
21	24+364.68m	26+300.80m	0.52%
22	26+300.80m	26+679.49m	0.00%
23	26+679.49m	27+057.98m	0.50%
24	27+057.98m	27+818.43m	-0.95%
25	27+818.43m	28+274.37m	0.00%
26	28+274.37m	30+259.74m	1.25%
27	30+259.74m	31+446.03m	-1.10%
28	31+446.03m	32+119.27m	0.00%
29	32+119.27m	32+990.05m	0.50%
30	32+990.05m	33+859.68m	-0.50%
31	33+859.68m	34+211.02m	0.00%
32	34+211.02m	35+392.71m	0.75%
33	35+392.71m	36+306.50m	-0.80%
34	36+306.50m	36+835.68m	0.00%
35	36+835.68m	38+292.15m	1.50%
36	38+292.15m	38+685.38m	0.00%

Figura 93 Tracciato altimetrico

Si inseriscono i dati relativi alle stazioni.

Stazioni				
ID	Stazione	Inizio banchina	Metà banchina	Fine banchina
[-]	[-]	[m]	[m]	[m]
A	Gayrettepe	908	1009	1111
B	Kağıthane	4512	4602	4692
C	Hasdal	9772	9862	9952
D	Kamerburgaz	15578	15668	15758
E	Göktürk	18699	18789	18879
F	Otogar	27093	27183	27273
G	İhsaniye	28658	28748	28838
H	Havalimani-2	32495	32585	32675
I	Havalimani-1	34666	34756	34846
J	Havalimani-3	37171	37261	37351

Figura 94 Stazioni

Si può notare come il numero di stazioni sia aumentato.

Si sono aggiunte infatti le stazioni di Hasdal e di Otogar, zone sulle quali Istanbul punta per un futuro sviluppo cittadino.

Si accetta infatti di avere un servizio più lento per poter sviluppare queste nuove zone.

Un'altra stazione aggiunta è quella di Havalimani-3, da dove poi la linea proseguirà per tornare verso Istanbul nella località di Halkali.

Gli scambi saranno i seguenti.

Scambi		
ID	Inizio	Fine
[-]	[m]	[m]
S1	0+244.20	0+458.84
S2	4+956.16	5+079.39
S3	10+210.56	10+333.80
S4	18+269.68	18+689.07
S5	22+038.00	22+161.23
S6	25+942.73	26+065.96
S7	28+303.83	28+427.06
S8	32+279.24	32+483.47
S9	34+286.70	34+409.93
S10	36+778.58	36+901.81

Figura 95 Scambi

In particolare si mantiene sempre un tronchino per l'eventuale sosta di treni in avaria nello scambio S4.

Nella stazione di Gayrettepe, data la nuova geometria del tracciato si è scelto di realizzare uno scambio non più in avanzstazione, ma in retrostazione. Come riportato in figura.

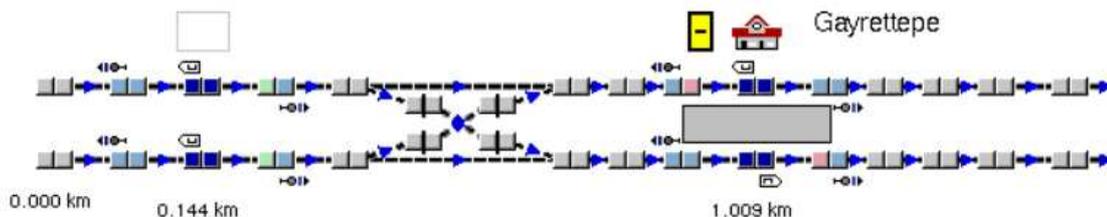


Figura 96 Scambio in retrostazione a Gayrettepe

Come si può osservare in figura in OpenTrack è necessario inserire una stazione fittizia per lo scambio in retrostazione. In questa stazione il treno, dopo aver effettuato lo scambio di linea, dovrà sostare per il tempo di inversione previsto e ripartire successivamente.

Il modello OpenTrack, per poter definire gli itinerari e le tabelle orarie in modo corretto, dovrà quindi contenere una stazione ed i suoi rispettivi segnali.

Per quanto riguarda l'alimentazione elettrica le sottostazioni fornite sono sintetizzate nella seguente tabella.

Sottostazione	Progressiva
[-]	[m]
T01	2+657.36
T02	6+364.79
T03	7+671.80
T04	11+396.14
T05	14+432.35
T06	20+807.48
T07	22+739.55
T08	24+585.52
T09	26+472.99
T10	29+589.78

Figura 97 Sottostazioni per l'alimentazione elettrica

Di queste sottostazioni, unicamente quelle in grassetto sono utilizzate.

Oltre alle sottostazioni lungo la linea l'alimentazione elettrica avverrà, come nel progetto definitivo, anche tramite le sottostazioni presenti nelle stazioni passeggeri.

In particolare per le simulazioni si elaborano due differenti scenari per ottenere i due casi estremi di consumo, modificando le zone alimentate da ogni sottostazione.

Queste saranno modellizzate come rappresentato in figura.



Figura 98 Simulazione 1

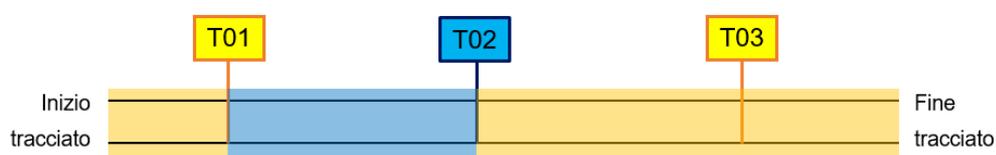


Figura 99 Simulazione 2

Si ricavano quindi per i due casi sopra descritti le zone alimentate.

ID	Posizione sottostazione	Scenario 1			Scenario 2		
		Limiti sottostazione		Lunghezza alimentata	Limiti sottostazione		Lunghezza alimentata
[-]	[km]	[km]	[km]	[km]	[km]	[km]	[km]
A	1.009	0	2.657	2.657	0	1.009	1.009
T01	2.657	2.657	4.602	1.945	1.009	2.657	1.648
B	4.602	4.602	7.672	3.07	2.657	4.602	1.945
T03	7.672	7.672	9.862	2.19	4.602	7.672	3.07
C	9.862	9.862	11.396	1.534	7.672	9.862	2.19
T04	11.396	11.396	15.668	4.272	9.862	11.396	1.534
D	15.668	15.668	18.789	3.121	11.396	15.668	4.272
E	18.789	18.789	22.74	3.951	15.668	18.789	3.121
T07	22.74	22.74	26.473	3.733	18.789	22.74	3.951
T09	26.473	26.473	27.183	0.71	22.74	26.473	3.733
F	27.183	27.183	28.748	1.565	26.473	27.183	0.71
G	28.748	28.748	32.585	3.837	27.183	28.748	1.565
H	32.585	32.585	34.756	2.171	28.748	32.585	3.837
I	34.756	34.756	37.261	2.505	32.585	34.756	2.171
J	37.261	37.261	43.287	6.026	34.756	43.287	8.531

Figura 100 Limiti di alimentazione delle sottostazioni

Una volta inseriti tutti i dati del tracciato il modello ottenuto in OpenTrack è il seguente.

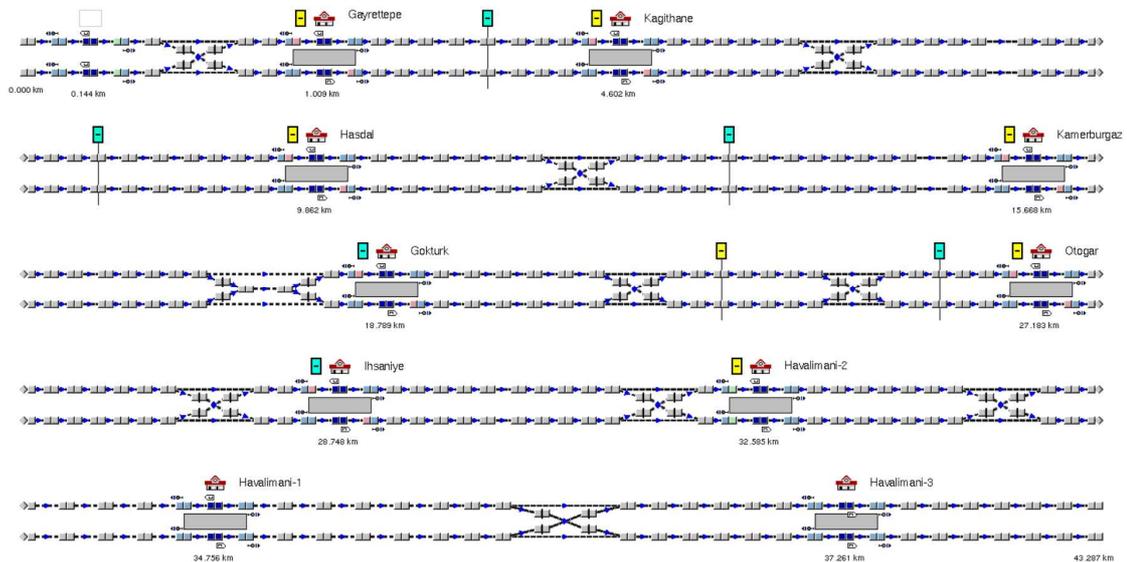


Figura 101 Modello dell'infrastruttura in OpenTrack

Nel modello non si inseriscono le sottostazioni di alimentazione poste dopo la stazione di Havalimani-2 in quanto questa viene usata come stazione terminale e quindi i treni non occupano mai la parte di tracciato dopo Havalimani-2.

4.1.2 Materiale rotabile

Non essendo state fornite informazioni aggiuntive nel corso dell'elaborazione del progetto esecutivo, si utilizzerà lo stesso set di treni utilizzato per le simulazioni del progetto definitivo (vedi capitolo 3.2.3 – set 2).

4.2 SIMULAZIONI

Le simulazioni che si effettueranno per lo studio del tracciato esecutivo saranno principalmente due:

- in primo luogo si analizzerà la linea tra Gayrettepe e Havalimani-2, ricavando tempi di percorrenza, consumi e altri dati sulla linea;
- quindi si passerà alla simulazione del servizio, ipotizzando che la linea continui anche oltre Havalimani-3 e se ne ricaveranno i relativi tempi di percorrenza.

Entrambe le simulazioni utilizzano un distanziamento tra i treni di 3 minuti.

4.2.1 Linea Gayrettepe – Havalimani-2

Nella seguente simulazione si andrà ad analizzare il servizio ferroviario fino alla stazione Havalimani-2, che in ordine è la prima stazione dell'aeroporto.

Si vuole in particolare studiare come sarebbe il servizio se alle stazioni terminali, il tempo per l'inversione di marcia dei treni dovesse essere di minimo 150 secondi (2m30s). Il valore di 150s deriva dall'ipotesi di non avere treni a guida automatica, ma con personale di bordo posto nella cabina frontale del treno. Una volta che il treno arriva alla stazione terminale il personale deve percorrere l'intera lunghezza del treno, per entrare nella cabina dal lato opposto del treno.

Ipotizzando una velocità di cammino di 5 km/h (lungo i 180 m del treno), 10 secondi per scendere e 10 secondi per salire nelle rispettive cabine e per le operazioni di bordo il tempo totale che si ottiene è il seguente.

$$T = 0.18/5 + 10 + 10 = 130 + 10 + 10 = 150 \text{ secondi}$$

Con un distanziamento dei treni pari a 3 minuti è chiaramente impossibile utilizzare un'unica banchina per le operazioni di inversione di marcia. I 30 secondi (180 secondi - 150 secondi) che il treno avrebbe a disposizione per le manovre di ingresso e di uscita dalla stazione non sono infatti sufficienti.

È necessario quindi l'impiego di entrambe le banchine, per poter mantenere il distanziamento voluto tra i treni.

Si impostano quindi gli itinerari dei treni in modo tale da garantire il servizio voluto. Il ciclo che i treni seguiranno sul tracciato sarà il seguente.

Si rappresentano in particolare gli scambi di Gayrettepe e di Havalimani-2 e le linee nei due sensi di marcia in modo schematico per comprendere meglio il funzionamento della linea.

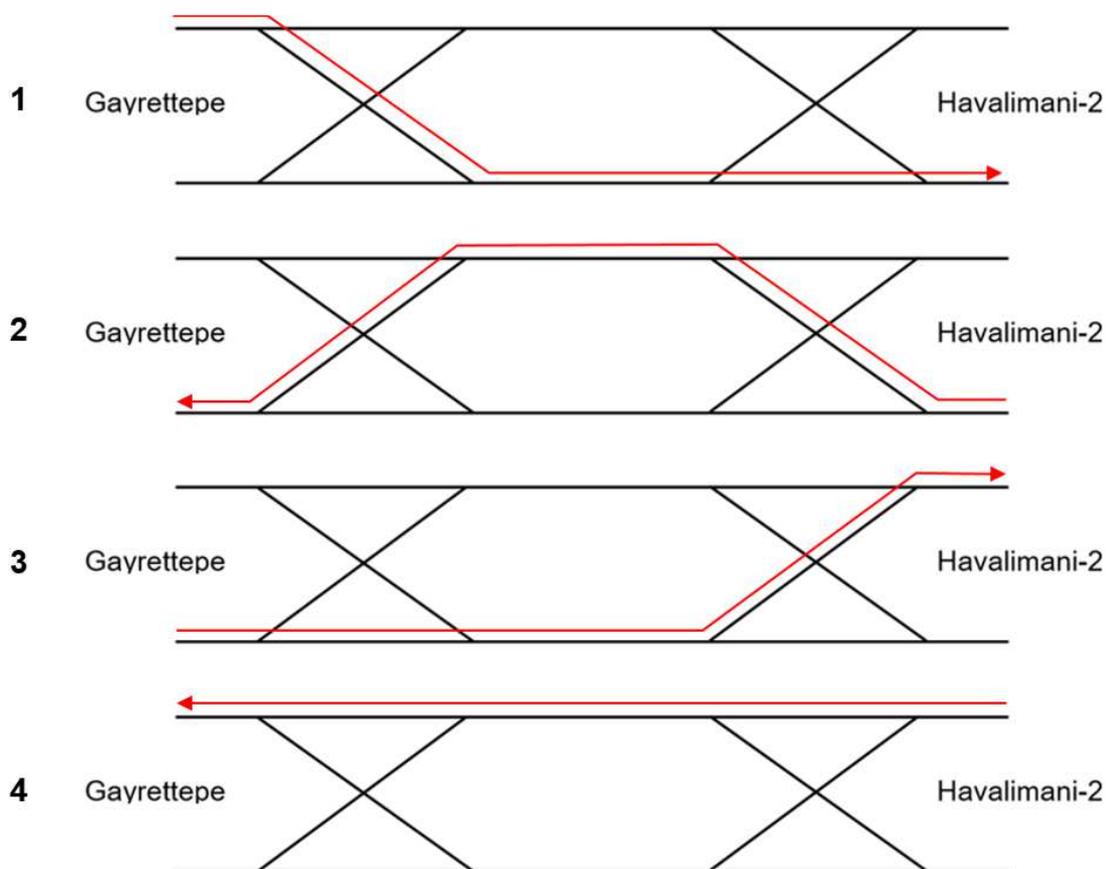


Figura 102 Percorsi dei treni in ordine cronologico

Essendoci due percorsi diversi per i due sensi di marcia si ottengono anche due diversi tempi di percorrenza per ogni direzione.

Svolgendo quindi le simulazioni si ottengono 4 diverse tabelle orarie, qui di seguito riportate con le rispettive velocità commerciali e i grafici v/d. La stazione fittizia di inversione viene riportata in grigio, in quanto non viene presa in considerazione per il calcolo delle velocità commerciali, non essendoci passeggeri a bordo.

Il tempo di sosta nelle stazioni viene preso pari a 20 secondi per tutte le stazioni.

Percorso 1

Stazione [-]	t_arrivo [mm:ss]	t_partenza [mm:ss]	t_sosta [mm:ss]	Stazioni [-]		t_interstazione [mm:ss]
Punto di inversione	-	00:00	-	Punto di inversione	Gayrettepe	01:27
Gayrettepe	01:27	01:47	00:20	Gayrettepe	Kagithane	02:46
Kagithane	04:33	04:53	00:20	Kagithane	Hasdal	04:06
Hasdal	08:59	09:19	00:20	Hasdal	Kemberburgaz	03:55
Kemberburgaz	13:14	13:34	00:20	Kemberburgaz	Gokturk	02:39
Gokturk	16:13	16:33	00:20	Gokturk	Otogar	05:24
Otogar	21:57	22:17	00:20	Otogar	Ihsaniye	01:44
Ihsaniye	24:01	24:21	00:20	Ihsaniye	Havalimani-2	03:10
Havalimani-2	27:31	-	-			

Figura 103 Tabella oraria percorso 1

Tempo [mm:ss]	Lunghezza [km]	Velocità comm. [km/h]
25:44	32.44	75.64

Figura 104 Velocità commerciale percorso 1

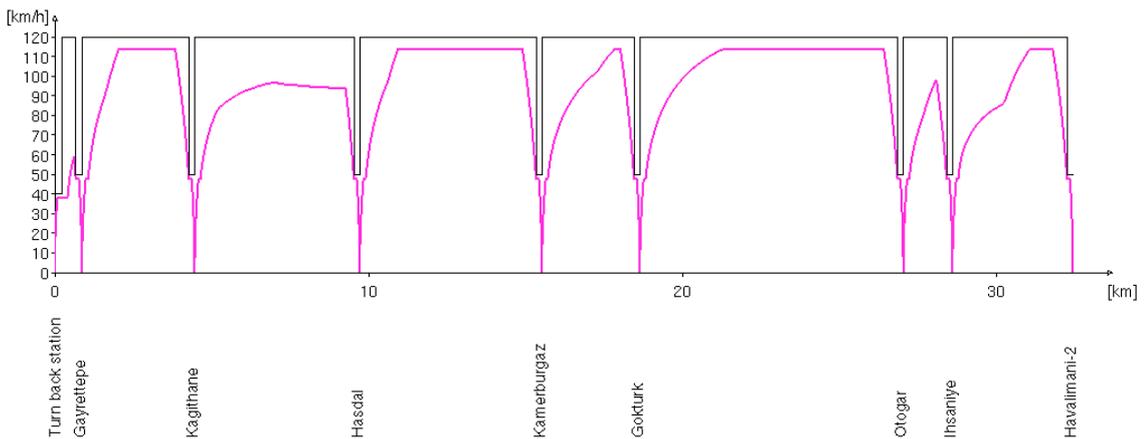


Figura 105 Grafico v/d percorso 1

Come si può notare, confrontando i tempi di percorrenza ottenuti con quelli del progetto definitivo, i tempi di percorrenza per raggiungere Havalimani-2 da Gayrettepe sono aumentati da 23:38 a 25:44, con una riduzione della velocità commerciale di circa 2 km/h.

Questo calo nell'efficienza del servizio risulta esiguo e permette di ottenere ben 2 stazioni in più lungo il tracciato, rivalutando le zone del territorio dove queste nuove stazioni sono localizzate e rendendo la linea più accessibile agli utenti. Le nuove stazioni di Hasdal e di Otogar infatti sono non a caso state localizzate in quelle tratte della linea dove le distanze interstazione risultavano maggiori, rispettivamente 11.066 km tra Kagithane e Kemberburgaz e 9.959 km tra Gokturk e

Ihsaniye. Ora invece la distanza interstazione maggiore si ha tra Gokturk e Otogar ed è pari a 8.394 km.

Si riportano ora di seguito i dati riguardanti gli altri percorsi.

Percorso 2						
Stazione	t_arrivo	t_partenza	t_sosta	Stazioni		t_interstazione
[-]	[mm:ss]	[mm:ss]	[mm:ss]	[-]		[mm:ss]
Havalimani-2	-	00:00	-	Havalimani-2	Ihsaniye	03:22
Ihsaniye	03:22	03:42	00:20	Ihsaniye	Otogar	01:45
Otogar	05:27	05:47	00:20	Otogar	Gokturk	05:19
Gokturk	11:06	11:26	00:20	Gokturk	Kemberburgaz	02:36
Kemberburgaz	14:02	14:22	00:20	Kemberburgaz	Hasdal	04:06
Hasdal	18:28	18:48	00:20	Hasdal	Kagithane	03:37
Kagithane	22:25	22:45	00:20	Kagithane	Gayrettepe	03:14
Gayrettepe	25:59	26:19	00:20	Gayrettepe	Punto di inversione	01:28
Punto di inversione	27:47	-	-			

Figura 106 Tabella oraria percorso 2

Tempo	Lunghezza	Velocità comm.
[mm:ss]	[km]	[km/h]
25:59	32.441	74.91

Figura 107 Velocità commerciale percorso 2

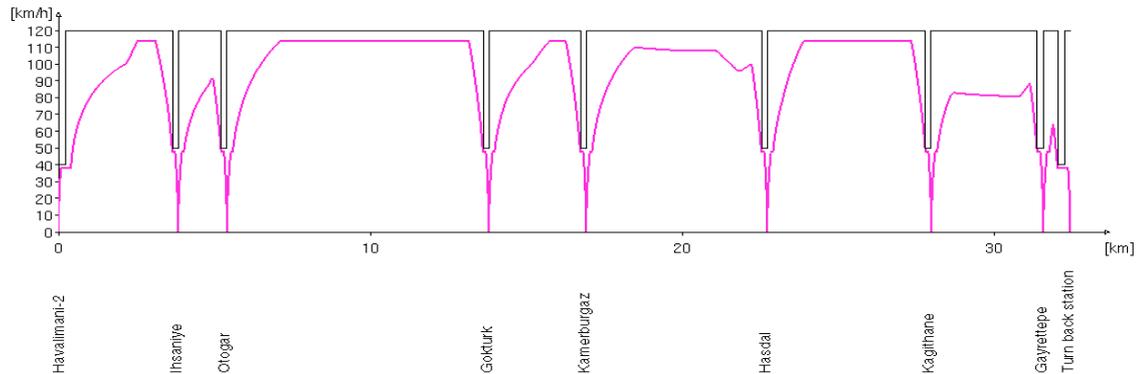


Figura 108 Grafico v/d percorso 2

I grafici v/d dei percorsi 3 e 4 sono simili a quelli dei percorsi 1 e 2 e non vengono quindi riportati. Variano invece leggermente i tempi di percorrenza e le velocità commerciali, per via del numero di passaggi negli scambi, dove il limite di velocità imposto è di 40 km/h.

Percorso 3

Stazione	t_arrivo	t_partenza	t_sosta	Stazioni		t_interstazione
[-]	[mm:ss]	[mm:ss]	[mm:ss]	[-]		[mm:ss]
Punto di inversione	-	00:00	-	Punto di inversione	Gayrettepe	01:14
Gayrettepe	01:14	01:34	00:20	Gayrettepe	Kagithane	02:46
Kagithane	04:20	04:40	00:20	Kagithane	Hasdal	04:06
Hasdal	08:46	09:06	00:20	Hasdal	Kemberburgaz	03:55
Kemberburgaz	13:01	13:21	00:20	Kemberburgaz	Gokturk	02:39
Gokturk	16:00	16:20	00:20	Gokturk	Otogar	05:24
Otogar	21:44	22:04	00:20	Otogar	Ihsaniye	01:44
Ihsaniye	23:48	24:08	00:20	Ihsaniye	Havalimani-2	03:27
Havalimani-2	27:35	-	-			

Figura 109 Tabella oraria percorso 3

Tempo	Lunghezza	Velocità comm.
[mm:ss]	[km]	[km/h]
26:01	32.44	74.81

Figura 110 Velocità commerciale percorso 3

La variazione rispetto al percorso 1 è esigua, entrambe le corse hanno infatti 1 passaggio negli scambi, ma in due punti diversi del tracciato.

Con il percorso 3 si arriva all'aeroporto in 27:35 contro i 27:31 del percorso 1, per un totale di 4 secondi di differenza.

Percorso 4

Stazione	t_arrivo	t_partenza	t_sosta	Stazioni		t_interstazione
[-]	[mm:ss]	[mm:ss]	[mm:ss]	[-]		[mm:ss]
Havalimani-2	-	00:00	-	Havalimani-2	Ihsaniye	03:01
Ihsaniye	03:01	03:21	00:20	Ihsaniye	Otogar	01:45
Otogar	05:06	05:26	00:20	Otogar	Gokturk	05:19
Gokturk	10:45	11:05	00:20	Gokturk	Kemberburgaz	02:36
Kemberburgaz	13:41	14:01	00:20	Kemberburgaz	Hasdal	04:06
Hasdal	18:07	18:27	00:20	Hasdal	Kagithane	03:37
Kagithane	22:04	22:24	00:20	Kagithane	Gayrettepe	03:14
Gayrettepe	25:38	25:58	00:20	Gayrettepe	Punto di inversione	01:13
Punto di inversione	27:11	-	-			

Figura 111 Tabella oraria percorso 4

Tempo	Lunghezza	Velocità comm.
[mm:ss]	[km]	[km/h]
25:38	32.439	75.93

Figura 112 Velocità commerciale percorso 4

Tra il percorso 4 e il percorso 2 la differenza risulta più accentuata. Nel percorso 2 infatti si hanno 2 scambi di linea, contro gli 0 del percorso 4. Come si può osservare infatti i tempi di percorrenza sono di 27:47 nel percorso 2 e di 27:11 nel percorso 4, per una differenza totale di 36 secondi.

Da questi risultati si può quindi desumere quale sia l'impatto sul servizio del passaggio del treno in uno scambio. Osservando i tempi interstazione e confrontandoli fra loro si può osservare come l'incremento nei tempi di percorrenza quando si effettua uno scambio sia all'incirca compreso tra i 15 e i 20 secondi.

La variabilità è dovuta al fatto che, a seconda di dove lo scambio si trova, la riduzione di velocità può essere maggiore o minore rispetto a quella che si avrebbe in piena linea.

$$\Delta v \gg \rightarrow \Delta t \gg$$

Si lancia quindi la simulazione e si elabora l'orario grafico tramite l'apposita finestra.

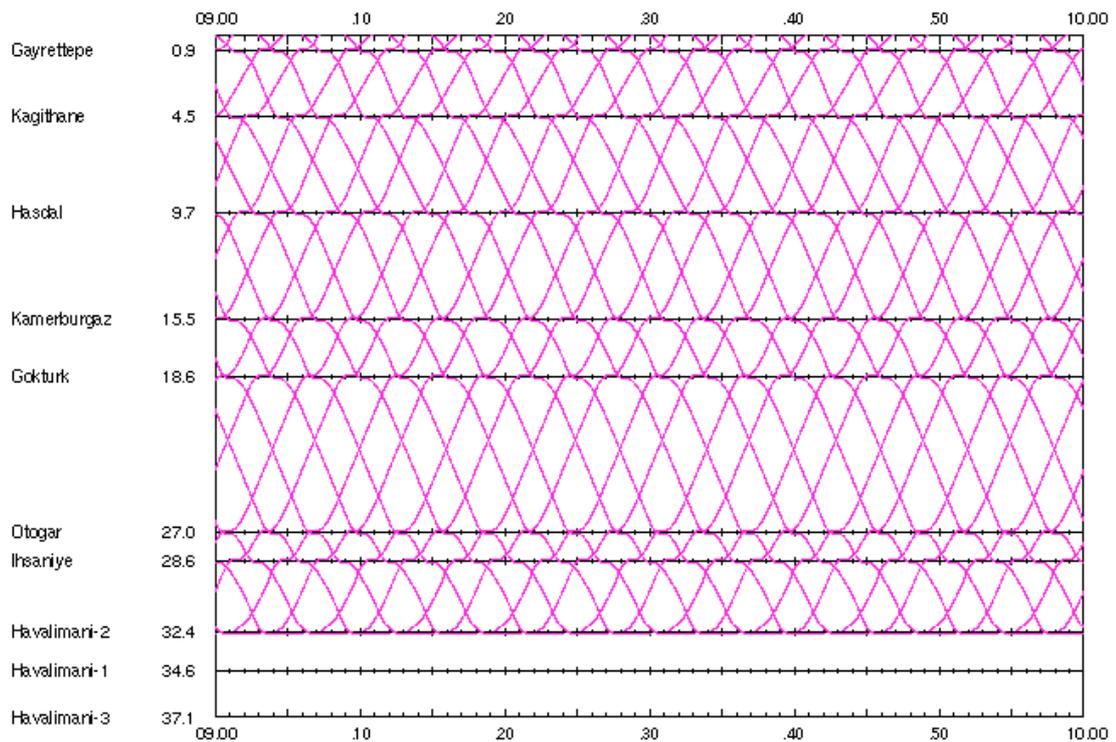


Figura 113 Orario grafico Gayrettepe - Havalimani-2

Il numero minimo di treni necessari per garantire il servizio con un distanziamento di 3 minuti e con un minimo di 150 secondi di tempo di inversione è pari a 21.

Si calcolano ora i tempi giro e le velocità medie.

	Tempo inversione		Tempo giro	Lunghezza	Velocità media
	Gayrettepe	Havalimani-2			
	[mm:ss]	[mm:ss]			
Percorsi 1-3	03:53	03:49	01:03:00	64.881	61.79
Percorsi 2-4	04:29	03:45	01:03:00	64.879	61.79

Figura 114 Tempi di inversione e di giro e velocità medie

Le capacità sono le stesse di quelle calcolate per la linea del progetto definitivo, in quanto il distanziamento rimane uguale (3 minuti).

Distanziamento	Treni/ora	n° treni	PHD (AW2)	PHD (AW3)
[s]	[1/h]	[-]	[1/h]	[1/h]
180	20	21	8960	13440

Figura 115 Capacità della linea

Si passa ora alle simulazioni del sottosistema di alimentazione dell'energia elettrica.

Come specificato in precedenza gli scenari da analizzare sono due:

- il primo dove le sottostazioni alimentano le tratte immediatamente successive alla posizione della sottostazione;
- il secondo dove le sottostazioni alimentano le tratte immediatamente precedenti rispetto alla posizione della sottostazione.

Essendo infatti le sottostazioni collegate in parallelo alla linea elettrica, per un calcolo esatto della corrente consumata sarebbero da attribuire i consumi dei treni in proporzione alle distanze del treno dalle due sottostazioni più vicine.

Più un treno è vicino ad una sottostazione più questa fornirà energia al treno.

OpenTrack non permette però questo tipo di calcolo ed è quindi necessario effettuare un'involuzione con i due scenari sopra indicati per ottenere dei risultati più attendibili.

I consumi elettrici indicati nelle tabelle e nei grafici seguenti sono consumi che tengono conto dei rendimenti (ipotesi del 92% come nel progetto definitivo) e dei consumi ausiliari (200 kW per ogni treno distribuiti nelle varie sottostazioni).

Per ricavare i dati esatti di consumo si estrapolano dagli output di OpenTrack i dati relativi ai consumi nelle singole sottostazioni nel tempo e si considerano 6 minuti di servizio nelle ore di punta (frequenza dei treni ogni 3 minuti). Si ricavano quindi le curve di consumo delle singole

sottostazioni nei due casi analizzati e se ne fa la somma per ottenere quelli che sono i consumi totali di tutto il sistema.

Negli orari grafici seguenti vengono rappresentate con colori diversi le zone alimentate nei due scenari.

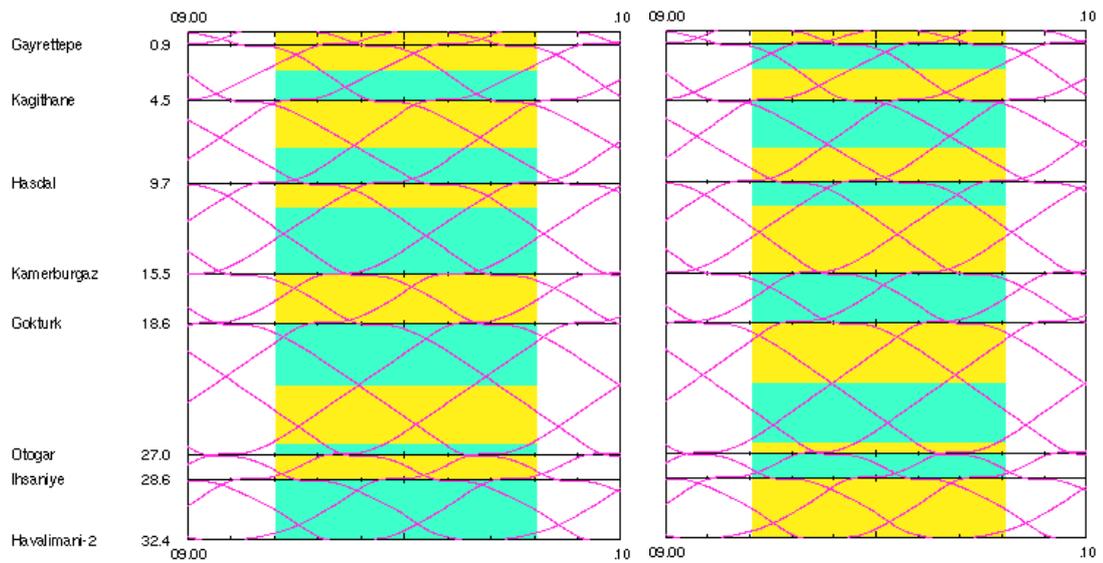


Figura 116 Zone alimentate scenario 1 (sinistra) e 2 (destra)

Le curve di consumo dello scenario 1 vengono qui di seguito riportate.

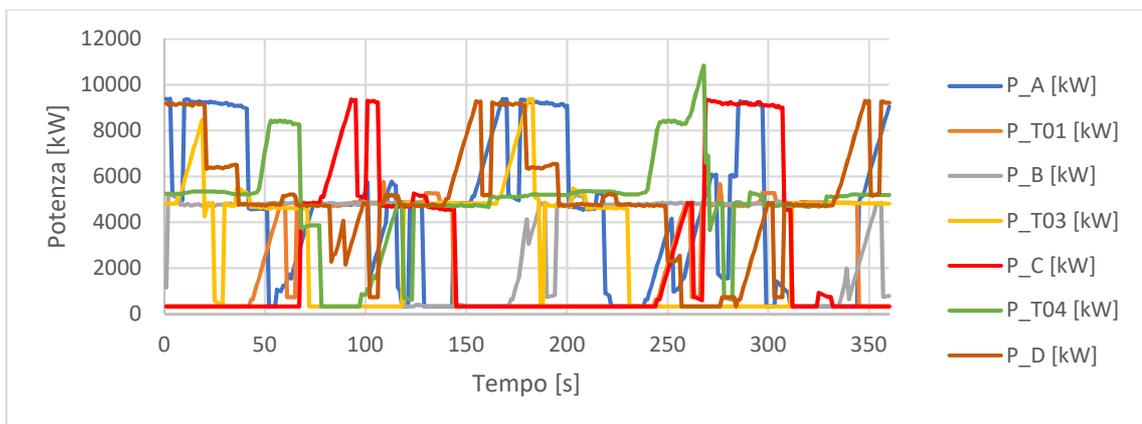


Figura 117 Consumi sottostazioni A-D (scenario 1)

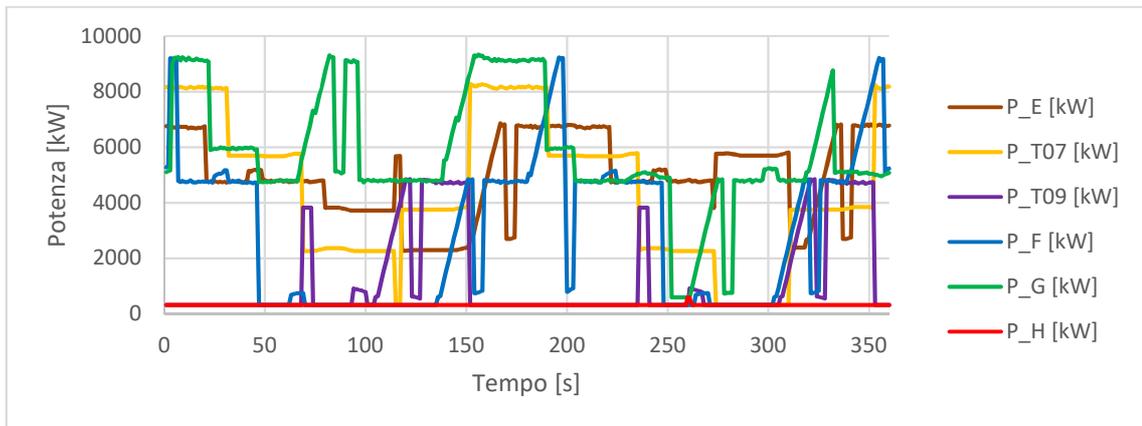


Figura 118 Consumi sottostazioni E-H (scenario 1)

Nella tabella vengono riportati i dati riassuntivi.

Sottostazioni	Lunghezza sezione [km]	P_min [kW]	P_med [kW]	P_max [kW]
A	2.657	323	2558	9393
T01	1.945	323	2558	5755
B	3.07	323	3533	5195
T03	2.19	323	3321	9387
C	1.534	323	2640	9361
T04	4.272	323	4940	10841
D	3.121	323	5046	9300
E	3.951	2267	4933	6859
T07	3.733	323	4435	8281
T09	0.71	323	1292	4852
F	1.565	323	2974	9233
G	3.837	599	5778	9334
H	2.171	323	325	599

Figura 119 Potenze minima, media e massima (scenario 1)

Come nel progetto definitivo la potenza fornita dalle sottostazioni è di 6 MW, con possibilità di fornire fino al 150% della potenza (9 MW) per massimo 2 ore e il 300% della potenza (18 MW) per non più di 60 secondi.

Nei grafici riportati sopra si può osservare come anche in questo caso in diverse sottostazioni si superino i 6 MW di potenza, ma per un tempo massimo mai superiore a 60 secondi. Il caso più critico risulta essere nella sottostazione G, con un picco di poco superiore a 9 MW della durata di 50 secondi. Non si hanno quindi decrementi nelle prestazioni del materiale rotabile.

La stessa analisi si fa per lo scenario 2.

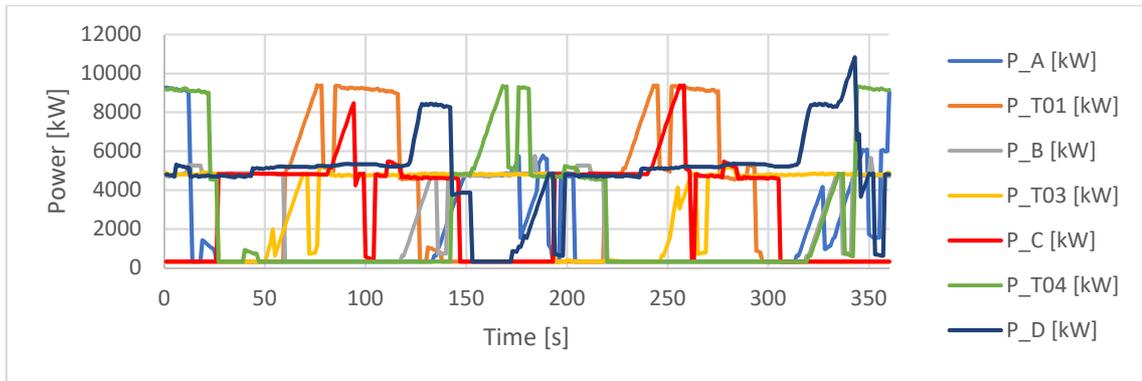


Figura 120 Consumi sottostazioni A-D (scenario 2)

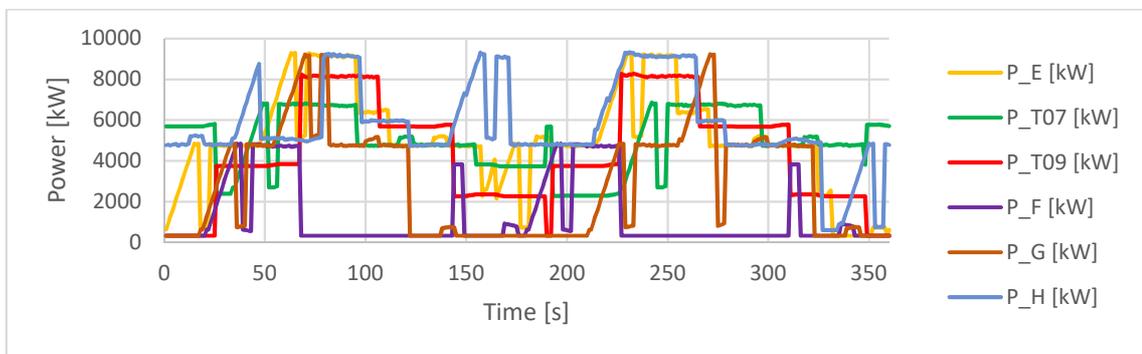


Figura 121 Sottostazioni E-H (scenario 2)

Si riportano quindi i dati riassuntivi in tabella.

Sottostazioni	Lunghezza sezione [km]	P_min [kW]	P_med [kW]	P_max [kW]
A	1.009	323	3048	9285
T01	1.648	323	3048	9393
B	1.945	323	2558	5755
T03	3.07	323	3533	5195
C	2.19	323	3321	9387
T04	1.534	323	2640	9361
D	4.272	323	4940	10841
E	3.121	323	5046	9300
T07	3.951	2267	4933	6859
T09	3.733	323	4435	8281
F	0.71	323	1292	4852
G	1.565	323	2974	9233
H	3.837	599	5779	9334

Figura 122 Potenze minima, media e massima (scenario 2)

Anche in questo caso si hanno diversi picchi che superano i 6 MW, il caso critico risulta essere la sottostazione H con consumi di 9 MW per 50 secondi.

I consumi totali (ottenuti sommando i consumi delle sottostazioni) sono riportati nel seguente grafico.

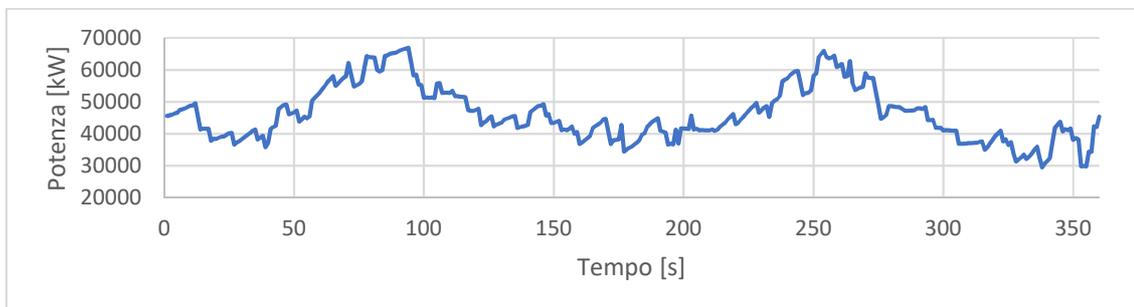


Figura 123 Consumi totali del sistema

I valori riportati nei grafici dipendono dalle posizioni dei treni lungo la linea. Nell'operazione di marcia reale dei treni sulla linea le posizioni variano da quelle modellizzate e quindi i consumi possono variare fornendo altre curve di consumo. Gli ordini di grandezza rimarranno comunque simili a quelli modellizzati.

4.2.2 Linea che prosegue dopo l'aeroporto

In quest'ultima fase del progetto si analizza quello che potrebbe essere il servizio ferroviario se non fosse necessaria l'inversione treni in corrispondenza dell'aeroporto e quindi nel caso in cui fosse completata la seconda parte del tracciato che dall'aeroporto riporta verso il Mar di Marmara ad Halkali.

I dati di questa seconda linea non sono ancora disponibili e quindi nel modello si crea il tracciato fino ad Havalimani-3 e si fanno "sparire" i treni nel tratto successivo verso Halkali.

In queste modellazioni si torna a simulare il servizio con GoA 4 e quindi senza personale di bordo. Ciò implica che non è più necessario avere dei tempi di inversione minimi di 150 secondi, ma si può scendere anche fino a tempi di inversione di circa 20 secondi. Questo ci permette nella stazione di Gayrettepe di non dover più necessariamente utilizzare due banchine, ma ne è sufficiente una.

Le altre ipotesi utilizzate nella modellazione precedente rimangono invariate.

Si creano in particolare 2 "path", uno da Havalimani-3 a Gayrettepe e uno da Gayrettepe ad Havalimani-3. Questi due path andranno a comporre l'itinerario utilizzato da tutti i treni.

Lanciando le simulazioni si ottiene che il tempo massimo di sosta dei treni nelle stazioni terminali, per garantire un servizio ogni 3 minuti, non può essere superiore a 99 secondi. Si utilizza quindi questo valore come tempo di inversione.

Di seguito si riportano le tabelle orarie e le velocità commerciali nelle due direzioni di marcia.

Stazione	t_arrivo	t_partenza	t_stop	Stazioni		t_interstazione
[-]	[mm:ss]	[mm:ss]	[mm:ss]	[-]	[-]	[mm:ss]
Havalimani-3	-	00:00	-	Havalimani-3	Havalimani-1	02:15
Havalimani-1	02:15	02:35	00:20	Havalimani-1	Havalimani-2	02:05
Havalimani-2	04:40	05:00	00:20	Havalimani-2	Ihsaniye	03:04
Ihsaniye	08:04	08:24	00:20	Ihsaniye	Otogar	01:45
Otogar	10:09	10:29	00:20	Otogar	Gokturk	05:19
Gokturk	15:48	16:08	00:20	Gokturk	Kamerburgaz	02:36
Kamerburgaz	18:44	19:04	00:20	Kamerburgaz	Hasdal	04:06
Hasdal	23:10	23:30	00:20	Hasdal	Kagithane	03:37
Kagithane	27:07	27:27	00:20	Kagithane	Gayrettepe	03:14
Gayrettepe	30:41	31:01	00:20	Gayrettepe	Punto di inversione	01:13
Punto di inversione	32:14	-	-			

Figura 124 Tabella oraria Havalimani-3 - Gayrettepe

Tempo	Lunghezza	v_comm
[mm:ss]	[km]	[km/h]
30:41	36.353	71.09

Figura 125 Velocità commerciale Havalimani-3 – Gayrettepe

Stazione	t_arrivo	t_partenza	t_stop	Stazioni		t_interstazione
[-]	[mm:ss]	[mm:ss]	[mm:ss]	[-]	[-]	[mm:ss]
Punto di inversione	-	00:00	-	Punto di inversione	Gayrettepe	01:29
Gayrettepe	01:29	01:49	00:20	Gayrettepe	Kagithane	02:46
Kagithane	04:35	04:55	00:20	Kagithane	Hasdal	04:06
Hasdal	09:01	09:21	00:20	Hasdal	Kamerburgaz	03:55
Kamerburgaz	13:16	13:36	00:20	Kamerburgaz	Gokturk	02:39
Gokturk	16:15	16:35	00:20	Gokturk	Otogar	05:24
Otogar	21:59	22:19	00:20	Otogar	Ihsaniye	01:44
Ihsaniye	24:03	24:23	00:20	Ihsaniye	Havalimani-2	03:10
Havalimani-2	27:33	27:53	00:20	Havalimani-2	Havalimani-1	02:06
Havalimani-1	29:59	30:19	00:20	Havalimani-1	Havalimani-3	02:18
Havalimani-3	32:37	-	-			

Figura 126 Tabella oraria Gayrettepe - Havalimani-3

Tempo	Lunghezza	v_comm
[mm:ss]	[km]	[km/h]
30:48	36.353	70.82

Figura 127 Velocità commerciale Gayrettepe - Havalimani-3

Dati sul giro:

Tempo inversione	Tempo giro	Lunghezza	Velocità media
[mm:ss]	[hh:mm:ss]	[km]	[km/h]
01:39	01:03:08	72.706	69.10

Figura 128 Tempo giro e velocità media

5 ALTRE ANALISI E SIMULAZIONI

5.1 SIMULAZIONI AGGIUNTIVE

In questo capitolo si analizzeranno casi critici di servizio ferroviario e si osserverà come il servizio cambia quando questi eventi critici si verificano.

5.1.1 Banalizzazione della linea

In caso di rottura dei binari, ostacoli o altri eventi che impediscano il passaggio dei treni in una parte della linea, il servizio viene garantito tramite l'utilizzo degli scambi. La linea ostacolata viene infatti banalizzata e si utilizzerà un'unica linea, rendendo quella parte di tracciato a binario unico.

Per calcolare il distanziamento minimo dei treni con le tratte tra gli scambi banalizzati si considerano i due scambi tra i quali si suppone avvenga il guasto o l'evento imprevisto.

Si fa viaggiare un singolo treno lungo tutta la linea sia in una direzione che nell'altra, non utilizzando però la tratta banalizzata. Si riporta di seguito un esempio.

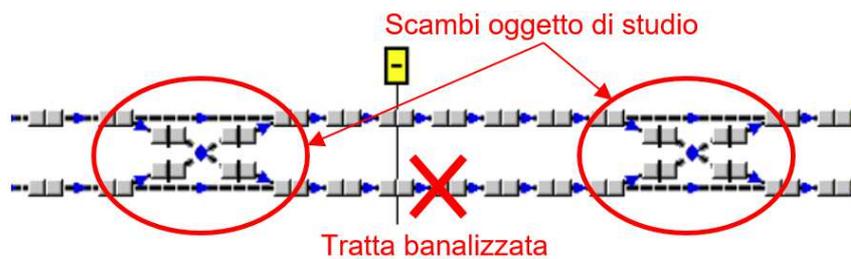


Figura 129 Esempio di tratta analizzata per banalizzazione

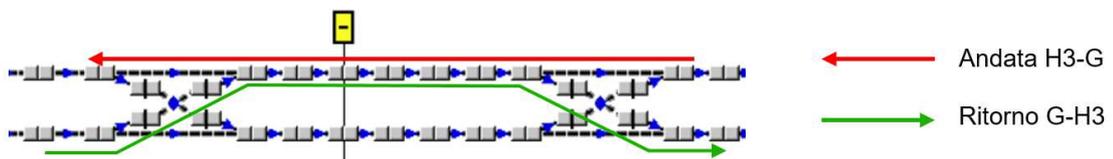


Figura 130 Itinerari impostati

Per definire il minimo distanziamento possibile tra i treni si utilizza quindi lo strumento “inspector” di OpenTrack, che permette di misurare quando un treno passa da un nodo e la sua velocità.

I treni, in caso di linea banalizzata, percorreranno la tratta a singolo binario a turno, prima passerà un treno in direzione Gayrettepe, quindi uno in direzione Havalimani-3 e così via. Il treno che segue dovrà quindi aspettare che il treno che sopraggiunge dall’altra direzione percorra la tratta a binario unico per poter a sua volta entrare in quella tratta.

Il distanziamento minimo tra i treni sarà quindi pari alla somma dei tempi di percorrenza dei treni nella tratta a binario unico nelle due direzioni.

Questi tempi di percorrenza possono essere misurati posizionando gli “inspector” all’inizio e alla fine dei rispettivi scambi come mostrato in figura.

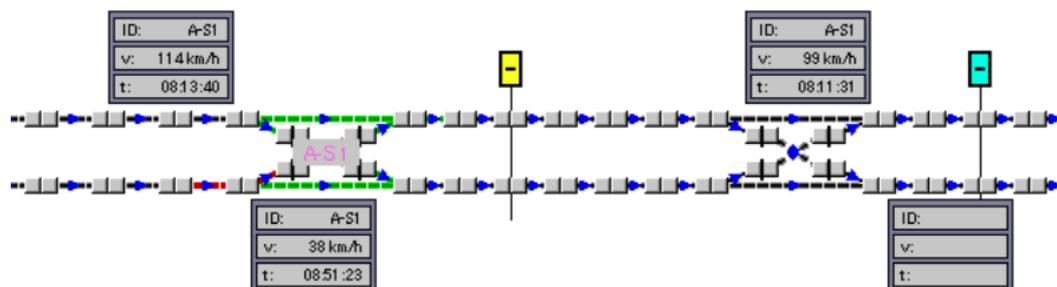


Figura 131 Misure dei tempi di passaggio con "inspectors"

Svolgendo la medesima misura per tutti gli scambi è possibile determinare l’impatto di un guasto delle diverse parti del tracciato sul servizio.

Come si può osservare alla pagina seguente, dove si riporta la tabella dei distanziamenti minimi e delle distanze tra gli scambi, la tratta più critica in cui può avvenire la banalizzazione è quella compresa tra gli scambi S3 e S4, tra i quali si misura infatti anche la distanza maggiore.

ID Scambi	Distanziamento minimo treni	Distanza scambi
[-]	[mm:ss]	[m]
S1-S2	10:44	4'666
S2-S3	09:07	5'254
S3-S4	13:15	8'207
S4-S5	07:08	3'620
S5-S6	05:13	3'905
S6-S7	06:04	2'361
S7-S8	08:10	4'016
S8-S9	05:10	1'967
S9-S10	05:56	2'492

Figura 132 Distanziamenti minimi con banalizzazione

Si avrà quindi un caso limite con distanziamento 13m15s e frequenza oraria corrispondente di 4.53 treni/h.

5.1.2 Ritardo per tempi di sosta prolungati

Nel servizio ferroviario, in particolare nelle ore di punta, si osserva nelle linee ferroviarie metropolitane un incremento dei tempi di sosta nelle stazioni, per via dei maggiori tempi necessari per la salita e la discesa dei passeggeri.

Risulta dunque utile verificare se in questi casi è possibile garantire un servizio ferroviario stabile, ovvero che sia in grado di recuperare eventuali ritardi accumulati lungo la linea.

OpenTrack permette di effettuare delle simulazioni impostando dei ritardi prefissati nei tempi di sosta alle stazioni. Questa funzionalità risulta particolarmente utile per verificare la stabilità del servizio ferroviario.

Per definire i ritardi è necessario innanzitutto definire una distribuzione probabilistica da assegnare al ritardo in un dato intervallo che si imposta nel nostro caso pari a 10 secondi.

La distribuzione che si sceglie è una distribuzione uniforme, come riportato nella funzione di densità di probabilità rappresentata nel grafico seguente.

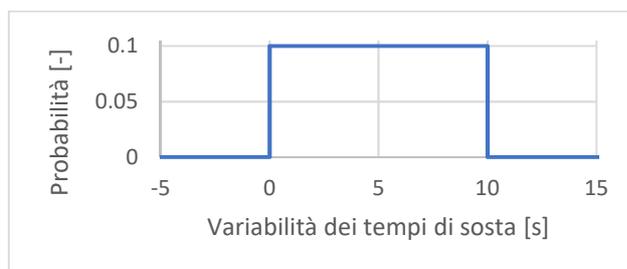


Figura 133 Funzione di densità di probabilità per i tempi di sosta

Tramite questa funzione si applica un ritardo casuale alle fermate dei treni nelle stazioni, con valori che variano appunto da 0 a 10 secondi. I tempi di fermata saranno quindi compresi tra 20 e 30 secondi.

Le simulazioni si svolgono come nella prima parte del progetto esecutivo tra le fermate Gayrettepe e Havalimani-2 e si utilizzano per l'inversione dei treni entrambe le banchine disponibili.

Dalle simulazioni si ottiene che i treni riescono a riassorbire agevolmente il ritardo accumulato nelle due stazioni terminali, grazie al tempo di "riserva" disponibile, che è compreso tra 1m15s e 1m59s (per GoA 2 dove i tempi di inversione devono essere di minimo 150 secondi) e tra 3m25s e 4m09s (per GoA 3-4 dove i tempi di inversione minimi sono di circa 20 secondi).

Per tempo di riserva si intende la differenza tra il tempo di inversione effettivo in caso di servizio puntuale e quello minimo di inversione che è possibile raggiungere con un dato grado di automazione.

Anche ipotizzando che si verifichi un ritardo di 10 secondi (ritardo massimo) in tutte le 6 stazioni intermedie, il servizio risulta recuperare a pieno i ritardi, in quanto questi ammonterebbero al massimo ad 1 minuto e sarebbero comunque minori dei tempi di "riserva" disponibili.

5.1.3 Avaria di un treno

Il secondo caso che si analizza è quello dell'avaria di un singolo treno. In questa simulazione si suppone che il guasto avvenga nella stazione di Kagithane e che il treno non possa viaggiare a una velocità superiore a 15 km/h.

Per poter ripristinare un servizio regolare è necessario rimuovere il treno in avaria dal tracciato, posizionandolo nell'apposito tronchino di emergenza, modellizzato in OpenTrack come rappresentato in figura e localizzato immediatamente prima della stazione di Gokturk.

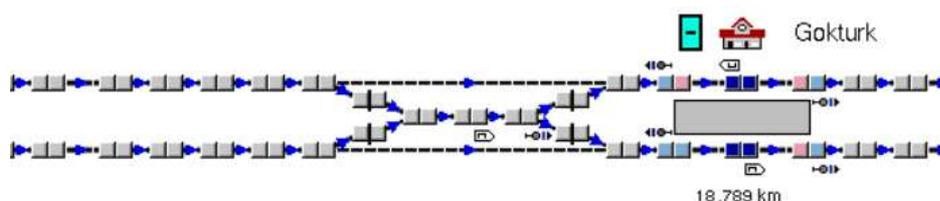


Figura 134 Tronchino di emergenza

I treni immediatamente successivi al treno in avaria lo seguiranno fino al tronchino, da dove potranno poi riprendere un servizio regolare.

Il distanziamento che questi treni avranno però, una volta che il tracciato è stato liberato dal treno in avaria, non sarà più 3 minuti ma sarà ridotto a 1m40s (minimo distanziamento).

Tutti i 18 treni della flotta sono incolonnati dietro al treno in avaria e si crea quindi un gap di tempo nel quale non si hanno più treni sulla linea. Questo gap, come si può osservare nel seguente grafico orario è ampio circa 27m (vedi parte in rosso in figura).

Durante questi 27 minuti non si hanno treni che passano sulla linea, questo risulta essere un grave deficit in quanto i passeggeri si accumulerebbero sulle banchine e il primo treno che transiterà subirà ritardi per tempi di sosta troppo elevati nelle stazioni dovuti all'imbarco dei numerosi passeggeri in attesa.

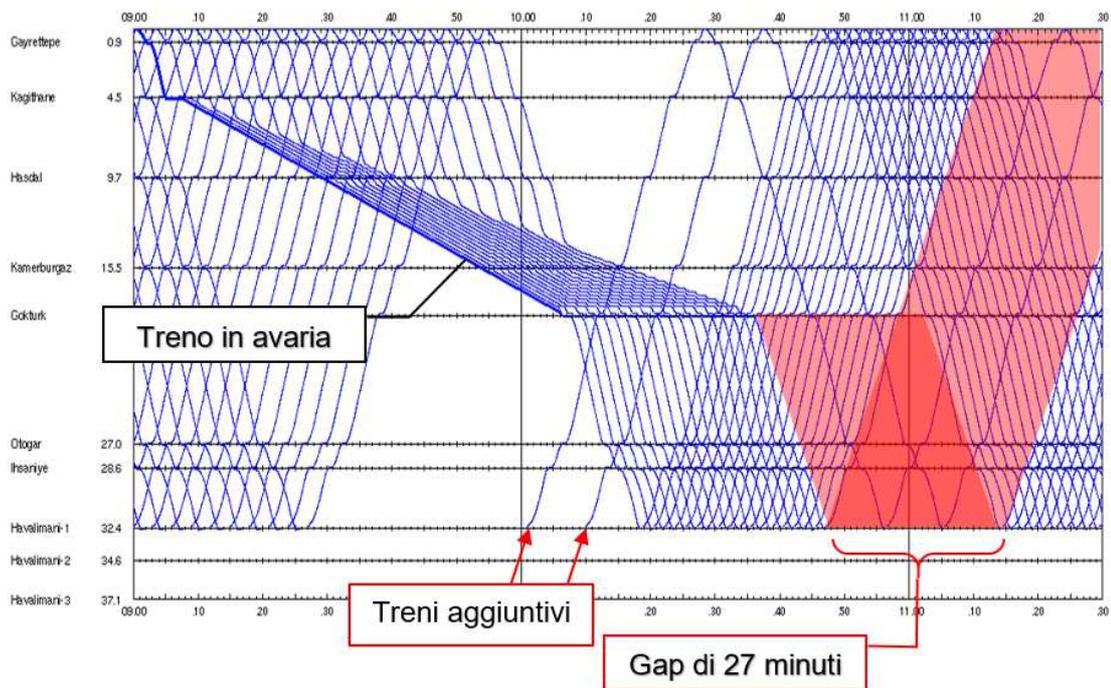


Figura 135 Aggiunta treni per avaria sulla linea

Per colmare questo gap si inseriscono sulla linea, partendo dall'aeroporto dove si prevede il posizionamento del deposito, due treni di emergenza, distanziati tra loro di 9 minuti.

Questi due treni permettono di colmare la lacuna nel servizio ferroviario, che può quindi tornare ad un servizio regolare.

Il grafico mostra quindi come il treno guasto rimanga sulla linea per un totale di 60 minuti (rosso), mentre il servizio torna ad essere regolare in tutte le stazioni dopo circa 1 ora e 35 minuti (rosso e giallo), seppur con cadenzamento variabile da 1m40s a 9m.

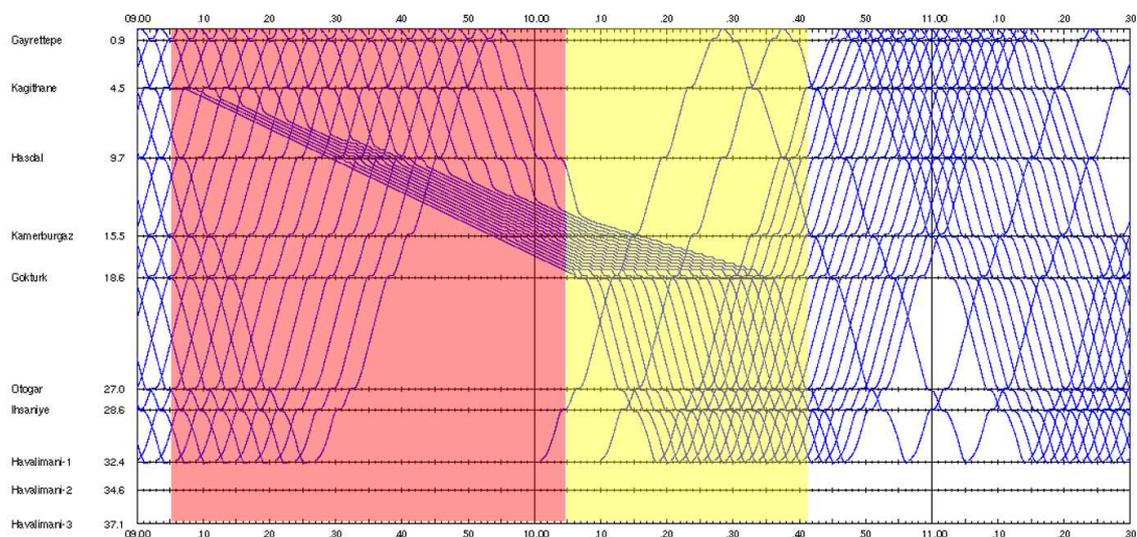


Figura 136 Grafico orario con durata impatti sulla linea

5.1.4 Perdita di una sottostazione

Nel caso di guasto di una delle sottostazioni di alimentazione della linea, è necessario garantire il servizio ferroviario prestabilito, senza perdite nelle prestazioni dei mezzi.

Si analizza il caso in cui si verifichi un guasto nella prima sottostazione di alimentazione.

In favore di sicurezza si utilizza il seguente schema di calcolo per le aree alimentate dalle varie sottostazioni, in modo tale da avere maggiori richieste di potenza nella seconda sottostazione.

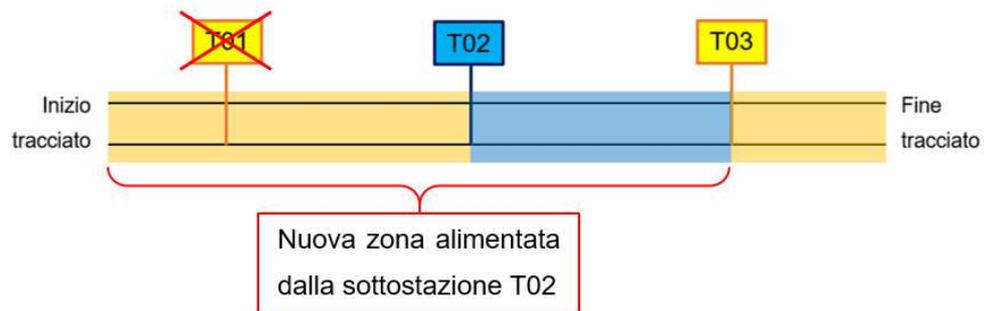


Figura 137 Guasto di una sottostazione

Le potenze richieste saranno quindi le seguenti.

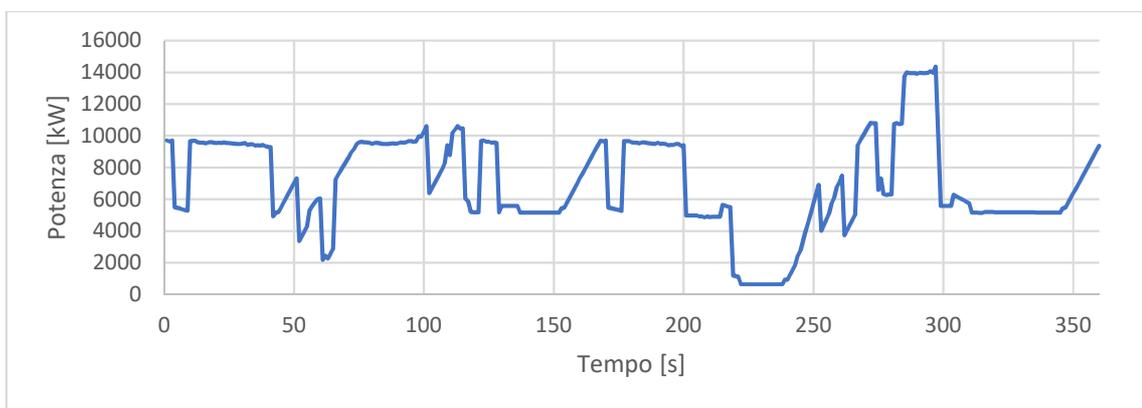


Figura 138 Potenze nella sottostazione T01 dopo il guasto nella sottostazione A

Come si può osservare dal grafico i picchi che superano la potenza erogata dalla sottostazione (6MW) non durano mai più di 60 secondi.

Essendo la sottostazione in grado di sopportare sovraccarichi di potenza fino al 300% della potenza nominale (18MW) per tempi inferiori a 60 secondi, non si verifica nessun deficit nelle prestazioni del servizio ferroviario.

5.2 ANALISI METODOLOGICHE

5.2.1 Distanziamento minimo treni

Un'analisi importante sulle caratteristiche della linea è quella riguardante il minimo distanziamento treni che si riesce a raggiungere sulla linea.

Il distanziamento è principalmente determinato dalla tipologia di materiale rotabile impiegato, dalle caratteristiche geometriche e operazionali della linea e dal sistema di segnalamento e di localizzazione treni utilizzato.

OpenTrack fornisce lo strumento “headway calculator”, che permette di definire il distanziamento minimo tra due treni che percorrono un dato itinerario. Il calcolo avviene tramite un metodo iterativo che simula la marcia dei treni scelti sulla linea, modificandone il distanziamento temporale. OpenTrack rileva quindi i conflitti che si verificano tra i treni e trova il minimo distanziamento che non dà conflitti, quello sarà il distanziamento minimo in quella tratta.

Headway Calculator

First Train

Course ID: 2001 Create Train Diagram

Performance [%]: 95 Res./Rel.: Moving

Train: 8 car (2*MTM-hyperbolic)

Second Train

Course ID: 2001 Create Train Diagram

Performance [%]: 95 Res./Rel.: Moving

Train: 8 car (2*MTM-hyperbolic)

Start Time Offset [s]:

Misc.

Mode: Search Headway

Headway from [s]: 40 to [s]: 120

Conflicts to avoid

- Stop at Signal
- Braking for Route
- Braking for Signal
- Braking for Approach Aspect
- Extended Dwell Time
- Change of Itinerary

Result

Status: Finished

Result: Headway [s]: 99.0

Comment:

Swap Trains Stop Start

Figura 139 Finestra per il calcolo del distanziamento minimo

Per analizzare la linea e le sue potenzialità, una volta definiti i dati di input, ovvero il materiale rotabile e l'infrastruttura, è utile conoscere quali possano essere i minimi distanziamenti e da cosa questi siano determinati.

Prima di tutto impostando gli itinerari nelle due direzioni si simula la marcia dei treni senza inversione di marcia. Si impostano dei tempi di sosta in tutte le stazioni di 20 secondi e si determinano i distanziamenti minimi.

Direzione di marcia	Distanziamento minimo
[-]	[s]
Gayrettepe – Havalimani-2	99
Havalimani-2 – Gayrettepe	92

Figura 140 Distanziamenti minimi per direzione di marcia

I conflitti che si hanno con distanziamenti minori di quelli riportati nella tabella precedente sono dovuti ai tempi di sosta nelle stazioni e non sono pertanto ulteriormente riducibili.

Si passa ora all'analisi del servizio con inversione di marcia nelle due stazioni terminali. I tempi necessari per l'inversione di marcia si assumono pari a 20 secondi, tempo che si può osservare in altre linee metropolitane automatiche con caratteristiche simili come la Metro C di Roma.

Per la manovra di inversione si può utilizzare un'unica banchina, a seconda della banchina impiegata si ottengono risultati differenti.

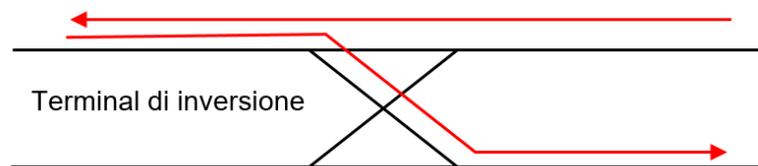


Figura 141 Manovra di inversione di marcia a destra

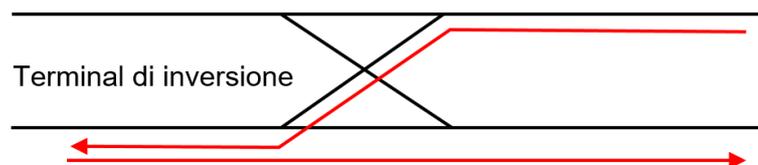


Figura 142 Manovra di inversione di marcia a sinistra

Stazione di inversione	Tipo di stazione terminale	Distanziamento minimo	
		Inversione a destra	Inversione a sinistra
[-]	[-]	[s]	[s]
Havalimani-2	Avanstazione	109	99
Gayrettepe	Retrostazione	100	106

Figura 143 Distanziamenti minimi con inversione in una banchina

Dai risultati riportati si può osservare come l'operazione di inversione di marcia, nel caso di inversione su una sola banchina, sia penalizzante in termini di frequenza del servizio. I valori di distanziamento tra i treni sono infatti maggiori a quelli misurati senza inversione.

Si può osservare inoltre come i risultati cambino se si utilizza la banchina di destra o quella sinistra o se la stazione sia in retrostazione o in avanstazione

Si effettua ora la stessa analisi, ma considerando che i treni possano usare entrambe le banchine in alternanza per l'inversione di marcia. L'obiettivo è quello di ridurre i distanziamenti minimi, per ottenere un servizio più frequente. Si riescono in questo modo a sfruttare al massimo le capacità della linea, con distanziamenti minimi condizionati dalle fermate lungo il tracciato e non più dai tempi di inversione. In questo caso quindi la frequenza dipende unicamente dai distanziamenti minimi della linea in direzione Havalimani-2.

Stazione di inversione	Tipo di stazione terminale	Distanziamento minimo
[-]	[-]	[s]
Havalimani-2	Avanstazione	99
Gayrettepe	Retrostazione	99

Figura 144 Distanziamenti minimi con inversione in due banchine

La frequenza massima dei treni ottenibile su questa linea risulta quindi essere pari a un treno ogni 99 secondi.

5.2.2 Relazione tra capacità e velocità

Uno studio interessante che è possibile fare sulla linea è quello di calcolare, per diversi regimi di servizio, quale possa essere la capacità massima che è possibile raggiungere con blocco mobile al variare della velocità, secondo l'approccio proposto da Lehner [9].

L'analisi non fornisce le capacità reali della linea, ma permette di scegliere la velocità da utilizzare per ottenere la massima capacità oraria.

Si considerano due treni, uno che precede e uno che segue, a determinare la capacità della linea sarà il distanziamento tra due treni consecutivi. Questo distanziamento dipende chiaramente dalla lunghezza dei treni e dal "gap" che vi è tra i due treni.

La lunghezza dei treni risulta per la nostra analisi un valore dato e dipende da lunghezza del singolo veicolo l' e dal numero di veicoli che compongono un treno n .

Lo spazio inter-treno dipende invece da:

- la velocità operativa v : considerata uguale per i due treni $v = v_1 = v_2$;
- il tempo di reazione t_r , del sistema in caso di ATO o del conducente in caso di guida automatica;
- i valori di decelerazione in caso di frenatura del primo e del secondo veicolo b_1 e b_2 .

In particolare questi ultimi due valori influenzano in modo rilevante il livello di sicurezza del servizio e determinano quindi diversi risultati anche in termini di capacità. In particolare un servizio più sicuro comporterà un distanziamento tra i treni maggiore e quindi una capacità inferiore.

Possono essere assunti diversi valori di decelerazione:

- decelerazione infinita $b = \infty$;
- decelerazione di emergenza b_e ;
- decelerazione normale b_n .

Al variare di questi valori per i due treni si sono definiti quindi cinque casi detti regimi di sicurezza, specificati meglio in figura.

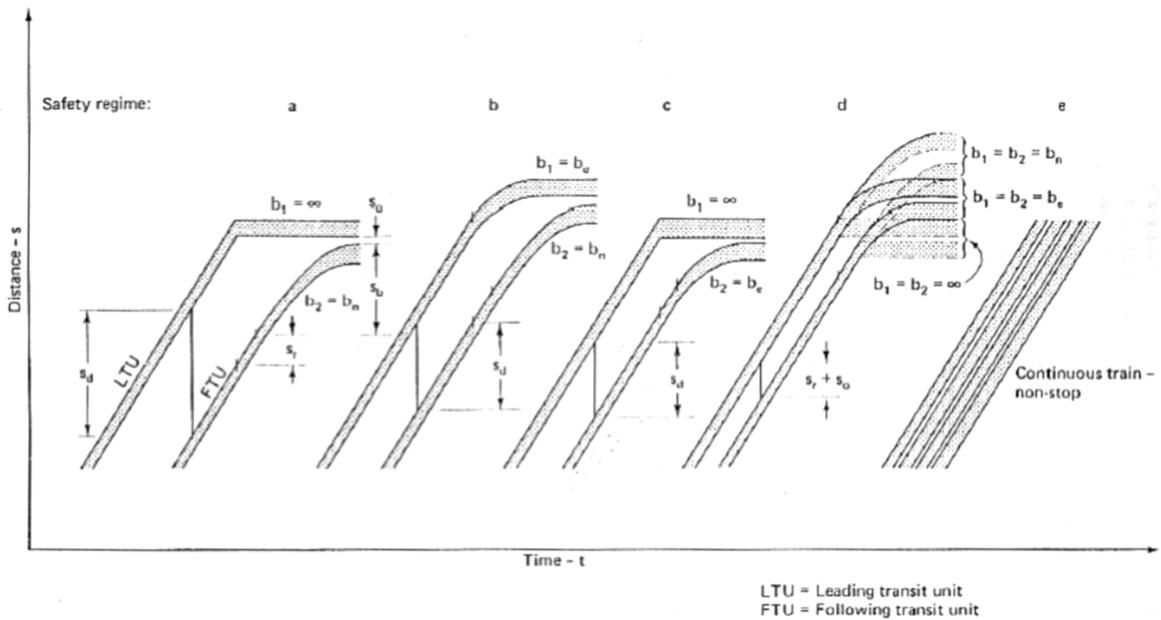


Figura 145 Regimi di sicurezza [1]

Il distanziamento dei treni deve essere tale da garantire in ogni regime che i treni non si scontrino tra loro. Saranno più sicuri i regimi nei quali il primo treno ha una maggiore decelerazione del secondo (a, b, c), mentre sono meno sicuri e non utilizzati in casi reali i regimi d ed e. In particolare il regime e ipotizza che i treni non frenino mai e risulta quindi un caso utopico, mentre il regime d ipotizza lo stesso grado di frenatura per entrambi i treni.

Per ogni regime si hanno quindi diverse formule che permettono di calcolare il minimo distanziamento e la capacità al variare della velocità.

Le espressioni generali utilizzate sono le seguenti.

Prima di tutto si ricava il minimo distanziamento spaziale, pari alla somma di lunghezza del treno con gap tra i treni.

$$s_{min} = n \cdot l' + s_{g,min}$$

$$s_{g,min} = v_2 \cdot t_r + \frac{v_2^2}{2 \cdot b_2} - \frac{v_1^2}{2 \cdot b_1}$$

Ponendo $v_2 = v_1 = v$ si ottiene l'espressione seguente.

$$s_{min} = n \cdot l' + t_r \cdot v + \frac{v^2}{2} \cdot \frac{b_1 - b_2}{b_1 \cdot b_2}$$

Da questa espressione si ricava il distanziamento temporale.

$$h_{w,min} = \frac{s_{min}}{v}$$

E quindi la capacità della linea (il valore C_v indica la capacità di un singolo veicolo).

$$C_w = \frac{n \cdot C_v}{h_{w,min}}$$

Applicando le formule precedenti per i diversi regimi di sicurezza si ottengono le seguenti curve.

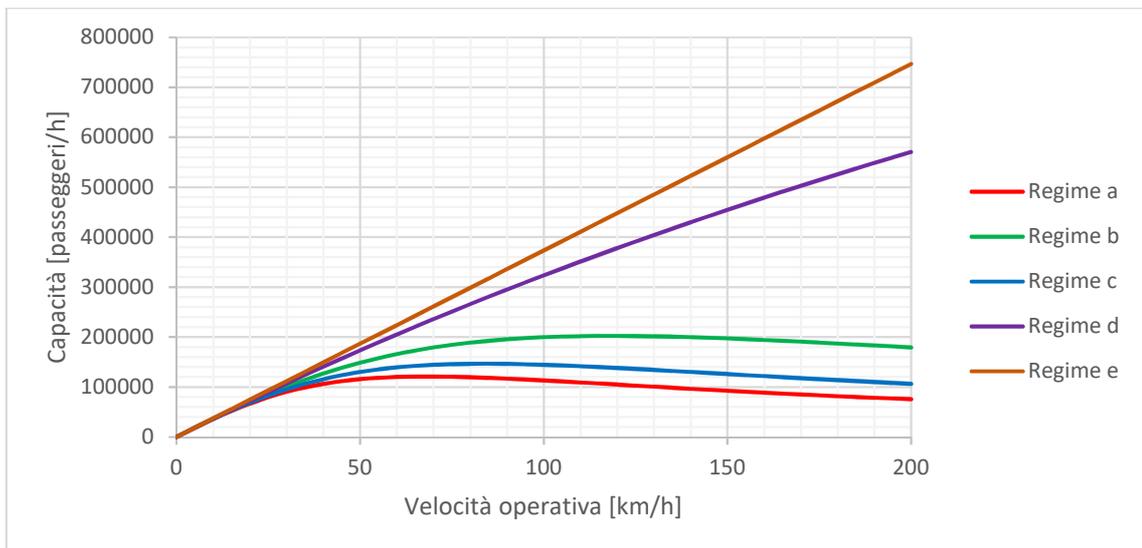


Figura 146 Curve di capacità per diversi regimi di sicurezza

I valori assunti per i calcoli sono i seguenti:

$$n = 8 \frac{\text{veicoli}}{\text{treno}}$$

$$C_v = 84 \frac{\text{passenger}}{\text{veicolo}}$$

$$l' = 22,5 \text{ m}$$

$$t_r = 1 \text{ s}$$

$$b_n = 1 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$b_e = 1,5 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

Come decelerazione operativa si utilizza il valore definito nel progetto definitivo di $1 \frac{m}{s^2}$.

Per la decelerazione di emergenza si impiega il valore utilizzato in treni standard, dove i passeggeri sono per la maggior parte seduti. Chiaramente nelle metropolitane la maggioranza dei passeggeri è in piedi e quindi il valore di decelerazione di emergenza risulta minore in quanto si vogliono evitare incidenti dovuti alla caduta di passeggeri. Ai fini dell'analisi si considera comunque in favore di sicurezza il valore di $1,5 \frac{m}{s^2}$ anche per le metropolitane.

Come si può osservare dal grafico si ottengono dei valori di massimo per velocità diverse a seconda dei regimi di sicurezza considerati.

I regimi di sicurezza utilizzati solitamente per linee automatiche esistenti sono i primi due. I valori massimi di capacità sono i seguenti.

	a	b	c	d	e
v^* [km/h]	68	118	84	inf.	inf.
$C_{w,max}$ [pass/h]	127503	73614	104106	inf.	inf.

Figura 147 Capacità massime per diversi regimi di sicurezza

Si può osservare come per il regime b, leggermente meno sicuro del regime a ma più prestante dal punto di vista del servizio, la velocità v^* per la quale si ottiene la massima capacità di linea corrisponde quasi perfettamente a quella considerata nel progetto (120 km/h).

In generale si può dedurre dalla precedente analisi come il blocco mobile non sia caratterizzato da un incremento incondizionato della capacità all'aumentare della velocità, ma presenti un valore ottimale di velocità per la quale si massimizza la capacità della linea.

6 CONCLUSIONI

In questa tesi si sono analizzati i vari aspetti che si studiano in una simulazione di un servizio ferroviario metropolitano, in particolare facendo riferimento alla nuova metropolitana di collegamento tra Istanbul e il Nuovo Aeroporto Internazionale.

La linea analizzata risulta essere al passo con i progressi tecnici che il trasporto metropolitano ha avuto negli ultimi anni. È stata infatti studiata per poter essere equipaggiata con sistemi di automazione integrale senza personale di bordo (UTO) e per utilizzare un sistema di segnalamento a blocco mobile, che ottenere un distanziamento tra i treni minore.

Le analisi svolte hanno permesso di comprendere meglio i principi di funzionamento di un programma di simulazione del servizio ferroviario, definendo quelli che sono gli input necessari al programma e gli output che questo fornisce.

Si sono studiate con il programma di simulazione OpenTrack le caratteristiche operative della linea, per poter definire nei vari scenari la flotta necessaria, i tempi di percorrenza, la velocità commerciale, i consumi e altre caratteristiche della linea.

Questi studi, in collaborazione con l'azienda Geodata S.p.A. sono poi stati utilizzati e inseriti tra i temi trattati nella progettazione, aggiungendosi e completando le analisi svolte dall'azienda (definizione del tracciato, sistemi di segnalamento, simulazioni elettriche, ventilazione, ... ecc.).

Si sono svolte quindi delle analisi su diverse variabili del sistema, osservando come i risultati cambiassero.

Per quanto riguarda le velocità operative in un sistema con blocco mobile si è osservato come ad aumenti di velocità corrisponda inizialmente un aumento della capacità, questo aumento presenta, dopo un valore di capacità massimo per una data velocità, una decrescita. Al variare del materiale rotabile impiegato e del livello di sicurezza prefissato è possibile cambiare la velocità alla quale si ottiene la capacità massima. Questo tipo di analisi può essere utilizzato nella concezione del sistema ed in particolare nella definizione della velocità operativa da impiegare sulla linea.

Per quanto riguarda i gradi di automazione si è potuta osservare un'importante conseguenza dell'impiego di sistemi con GoA2 rispetto a sistemi con GoA 3 e 4, ovvero la necessità di tempi di inversione maggiori, dovuti al tempo necessario al macchinista per spastarsi nella cabina al lato opposto del treno. Questi tempi di inversione risultano particolarmente rilevanti nel caso in analisi (150 secondi) per via della elevata lunghezza dei treni impiegati (180m). I tempi di inversione hanno un impatto importante sul servizio in quanto comportano un notevole vincolo sul distanziamento minimo utilizzabile sulla linea.

Sempre per via dei lunghi tempi di inversione per sistemi con GoA 2 non è possibile attuare la manovra di inversione di marcia su un'unica banchina con i distanziamenti definiti (180 secondi). Questo rende più difficoltosa l'utilizzazione della seconda banchina per una futura linea, rendendo il servizio meno flessibile.

Un altro aspetto interessante trattato è stato quello del servizio in caso di banalizzazione della linea tra due scambi. Si è potuto osservare in particolare come, al variare della distanza tra gli scambi, i distanziamenti minimi tra i treni aumentino anche in modo rilevante.

Un altro caso di guasto con un impatto notevole sul servizio è quello del guasto di un treno. In questo scenario un ruolo importante lo svolgono il numero e la posizione dei tronchini per la sosta di emergenza dei treni o la posizione di eventuali depositi. Più punti sulla linea sono disponibili per la sosta dei treni, meno tempo è necessario ai treni per raggiungere questi punti e meno grave risulta essere l'effetto del guasto sul servizio.

In questi due scenari descritti è necessario chiaramente attuare con la committenza uno studio di costi e benefici, per verificare quanto effettivamente costi posizionare più scambi o più depositi/punti di sosta lungo la linea, per definire un livello di disservizio "accettabile".

Come si può osservare negli esempi precedenti, lo studio svolto ha permesso quindi di comprendere meglio le variabili che influenzano il servizio metropolitano e di individuare gli impatti che queste variabili hanno sulla linea, fornendo al committente dei dati utili per attuare scelte specifiche nella progettazione.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Vukan R. Vuchic, “Urban Transit: Systems and Technology”, John Wiley & Sons, 2007
- [2] “Rapporto sull’incidentalità dei trasporti”, Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, 2009
- [3] “World report on metro automation”, UITP, Luglio 2016
- [4] Ingo Arne Hansen e Jörn Pachl, “Railway Timetabling & Operations”, Eurail press, 2014
- [5] Vukan R. Vuchic, “Urban Transit: Operations Planning and Economics”, John Wiley & Sons, 2005
- [6] Daniel Huerlimann e Andrew B. Nash, “OpenTrack: Simulation of railway networks – Version 1.9”, OpenTrack Railway Technology Ltd. ETH Zurich Institute for Transport Planning and Systems
- [7] Reza Zanjirani Farahani e Elnaz Miandoabchi, “Graph Theory for Operations Research and Management: Applications in Industrial Engineering”, Business Science Reference, 2013
- [8] R. De Pietro, M. Ignaccolo e G. Inturri, “The recovery of train braking energy: the case of Catania (Italy) metro line”, WIT Press, 2003
- [9] Friedrich Lehner, “Menge, Arbeit, Leistung und Wirkungsgrad im Verkehr”, Erich Schmidt Verlag, 1949
- [10] “IEC – 62290-1 Ed. 2, Railway applications – Automated urban guided transport (AUGT) – Safety requirements”, IEC, 2014
- [11] “Automatic Train Control in Rapid Rail Transit”, Office of Technology Assessment, Maggio 1976
- [12] Lucio Mayer e Giuseppe Vicuna, “Compendio di tecnica ferroviaria”, Collegio di Ingegneri Ferroviari Italiani, 1976
- [13] Ian Peter Milroy, “Aspects of automatic train control”, Loughborough University, Luglio 1980
- [14] Jonathan Peter Powell, Anna Fraszczyk, Chun Nok Cheong e Ho Ki Yeung, “Potential Benefits and Obstacles of Implementing Driverless Train Operation on the Tyne and Wear Metro: A Simulation Exercise”, Xuesong Zhou, Dicembre 2016

- [15] Bruno Dalla Chiara, “Dispense: Tecnica ed Economia dei Trasporti”, DIATI - Politecnico di Torino, 2015
- [16] Bruno Dalla Chiara, “Engineering and design o railway systems”, CLUT, 2012
- [17] Peter Wigger, “Experience with Safety Integrity Level (SIL) Allocation in Railway Applications”, ISEB – TÜV Rheinland / Berlin-Brandenburg Group

SITOGRAFIA

- [a] Population Division of the Department of Economic and Social Affairs of the United Nations (2014): <https://esa.un.org/unpd/wup/>
- [b] European Environment Agency (2014):
<https://www.eea.europa.eu/media/infographics/co2-emissions-from-passenger-transport/view>
- [c] World Population Review (2017): <http://worldpopulationreview.com/>
- [d] Observatory of Automated Metros (2016): <http://metroautomation.org/>
- [e] Wikipedia (2010): <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=10878419>
- [f] Wikipedia (2007): <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=2730557>
- [g] Bangalore Metro Rail Corporation:
<https://media.licdn.com/mpr/mpr/AAEAAQAAAAAAAAAdnAAAAJDExNjQ5YmIxLWU1NzctNDhiMS04NGMxLWFmNDJhMjIwZmUzOQ.png>
- [h] Wikipedia (2011): <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=16041372>
- [i] Tomtom (2016): https://www.tomtom.com/en_gb/trafficindex/city/istanbul
- [j] Metro Istanbul (2016): <http://www.metro.istanbul/>
- [k] Airport solutions (2014): <http://www.airportsolutions.com/turkey/why-turkey>
- [l] Siemens (2015): <https://mobilitymatters.siemens.nl/assets/uploads/2015/09/Digital-Metro.pdf>