



**Politecnico
di Torino**

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile
A.A. 2020/2021

**Esercizio ferroviario su linee a scarso
traffico:
analisi comparativa di soluzioni basate
su treni convenzionali, tram-treno e ad
idrogeno**

Relatore:
Prof. Bruno DALLA CHIARA

Candidata:
Emilia SANTACATERINA

Dicembre 2021

Abstract

Il presente lavoro di tesi di laurea magistrale pone le basi, in primo luogo, sull'idea di riutilizzare tutte le risorse già disponibili ancorché al passo con i tempi, prima ancora di creare nuove soluzioni, come appunto sono le ferrovie secondarie, oggi talvolta non più utilizzate. La decisione relativa alla chiusura di alcune linee ferroviarie è da ricercarsi prevalentemente in ragioni di carattere economico: è vero che talvolta tali linee risultano scarsamente frequentate, ma è anche vero che proprio per il loro carattere di reti secondarie sorgono in contesti non densamente abitati e in città di medie o piccole dimensioni. Pertanto, in queste situazioni, risulta talvolta impossibile sostenere l'esercizio ferroviario con il materiale rotabile e le regole ferroviarie convenzionali: i rotabili oltre ad essere più molto costosi di alternative oggi fruibili o ipotizzabili, spesso viaggiano semi – vuoti, comportando dunque sprechi ingiustificati. È in questo contesto che il lavoro di tesi si ripropone di trovare soluzioni che possano essere meno onerose e più al passo con i tempi, grazie all'utilizzo di materiale rotabile più leggero come può essere quello di un tram – treno; un'altra soluzione può essere ricercata nell'utilizzo di materiale rotabile che, indicativamente a parità di costo, risulti più moderno e con meno emissioni nonché impatto ambientale, come possono essere i treni alimentati ad idrogeno oppure di treni con pantografo e batteria. Infatti tali linee risultano quasi sempre non elettrificate, pertanto riprendere l'esercizio con un treno con motore diesel, in un'epoca in cui ci si pone come obiettivo quello della graduale de-carbonizzazione, è perlomeno discutibile, specie dal punto di vista ambientale.

La tesi affronta quindi, dopo una disamina dello stato dell'arte in materia, l'analisi dell'esercizio con i treni diesel, il calcolo dei relativi consumi e il confronto con quelli relativi alle soluzioni meno convenzionali o innovative che svolgono il medesimo esercizio.

Le conclusioni sono incentrate sulla ricerca della soluzione più conveniente per poter sfruttare al meglio queste linee.

Abstract

This master's thesis work is based, first of all, on the idea of reusing all the resources already available, even if they are up to date, before creating new solutions, such as secondary railways, which are sometimes no longer used. The decision to shut down certain railway lines was taken mainly for economic reasons: it is true that these lines are sometimes poorly used, but it is also true that, precisely because they are secondary networks, they are located in sparsely populated areas and in small or medium-sized towns. Therefore, in these situations, it is sometimes impossible to sustain railway operations with conventional rolling stock and railway rules: in addition to being more expensive than alternatives that can be used or envisaged today, rolling stock often runs semi-empty, thus leading to unjustified waste. It is in this context that the thesis aims to find solutions that are less costly and more in step with the times, thanks to the use of lighter rolling stock such as tram-trains; another solution can be found in the use of rolling stock which, at approximately the same cost, is more modern and with fewer emissions and environmental impact, such as hydrogen-powered trains or trains equipped with pantographs and batteries. In fact, these lines are almost always not electrified, so resuming operation with a diesel-engined train, at a time when the aim is to gradually de-carbonise them, is at least questionable, especially from an environmental point of view.

After an examination of the state of the art in this field, the thesis then analyses operation with diesel trains, tackles the calculation of the relative consumption and compares it with that of less conventional or innovative solutions that perform the same operation.

The conclusions focus on finding the most convenient solution to make the most of these lines.

Indice

Indice delle figure	7
Indice delle tabelle	8
1. PANORAMA FERROVIARIO ITALIANO	11
1.1. Introduzione	11
1.2. Deverticalizzazione	14
1.3. Rete ferroviaria piemontese	17
1.4. Storia delle linee ferroviarie secondarie a scarso traffico	18
1.5. Cause che hanno portato all'inutilizzo delle linee secondarie.....	21
1.6. Linea ferroviaria Savigliano – Saluzzo – Cuneo.....	23
2: STATO DELL'ARTE.....	27
2.1. Inquadramento generale del sistema tram - treno	27
2.1.1 Definizione e classificazione.....	28
2.1.2 Adattamento con la linea ferroviaria: differenze tra i due sistemi	30
Scartamento.....	30
Alimentazione elettrica	31
Interazione ruota - rotaia	32
Sagoma del veicolo e accessibilità	33
Resistenza strutturale dei veicoli.....	34
Sicurezza e segnalamento.....	34
2.1.3 Prototipi di tram-treno esistenti nel mondo	35
2.1.4 Il sistema Karlsruhe.....	37

2.1.5	Italia: la metro Sassari	38
2.2.	Il treno a idrogeno	39
2.2.1	Tecnologia e caratteristiche.....	40
2.3.	Il treno diesel Minuetto	42
3: ANALISI DELLA PRECEDENTE OFFERTA ED ESERCIZIO CON TRENO A IDROGENO E TRAM - TRENO		44
3.1	Meccanica della locomozione ferroviaria	44
3.2	Resistenze al moto.....	48
	Resistenze al moto ordinarie	48
	Resistenze accidentali	49
3.3	Equazione del moto.....	51
3.4	Parametri di un sistema di trasporto.....	52
3.5	Caratteristiche della linea Saluzzo – Savigliano	54
3.6	Esercizio svolto prima della chiusura: Minuetto.....	56
	Savigliano - Saluzzo.....	58
	Saluzzo – Savigliano	61
3.7	Esercizio svolto con il treno a idrogeno	65
	Savigliano – Saluzzo	66
	Saluzzo – Savigliano	69
3.8	Esercizio svolto con il tram – treno.....	72
	Savigliano – Saluzzo	73
	Saluzzo – Savigliano	78

4. ANALISI MULTICRITERI E CONCLUSIONI	83
4.1. Metodi di analisi multicriteri: generalità	83
4.1.1 Classificazione	84
4.2. Electre	86
Relazione di surclassamento	87
Test di concordanza.....	87
Test di discordanza.....	89
Grafo di surclassamento	90
4.3. Electre II: applicazione.....	90
4.3.1 Analisi di sensitività	97
4.4. Potenziale domanda da servire	103
4.5. Sintesi dei risultati ottenuti.....	107
4.6. Conclusioni	108
Bibliografia	111

Indice delle figure

Figura 1: energia consumata per passeggero per km [1].....	11
Figura 2: classificazione della rete RFI in cifre [4].....	14
Figura 3: suddivisione della rete ferroviaria in Piemonte [4].....	17
Figura 4: classificazione in cifre della rete ferroviaria piemontese [4].....	18
Figura 5: popolazione nel mondo [1].....	21
Figura 6: autovetture per 1000 abitanti in Europa, anno 2019 [10].....	22
Figura 7: orario grafico del servizio svolto fino al 2012.....	25
Figura 8: orario grafico del servizio svolto nel 2019.....	25
Figura 9: profilo del cerchione adottato a Karlsruhe (quote in mm) [14].....	33
Figura 10: veicolo bimodale presso la stazione centrale [14].....	38
Figura 11: emissioni di gas causate dal settore dei trasporti [18].....	39
Figura 12: Coradia Stream a idrogeno [24].....	42
Figura 13: treno Minuetto.....	43
Figura 14: schema di interazione ruota – infrastruttura (ruota motrice).....	44
Figura 15: andamento del coefficiente di aderenza in funzione dello scorrimento.....	46
Figura 16: curve di Metzkwow – Muller del coefficiente di aderenza.....	46
Figura 17: caratteristica meccanica di trazione.....	47
Figura 18: coefficienti per il calcolo della resistenza ordinaria specifica utilizzando la formula binomia.....	49
Figura 19: coefficienti per il calcolo della resistenza ordinaria specifica utilizzando la formula trinomia.....	49
Figura 20: valori di resistenza specifica in curva proposti da FS.....	50
Figura 21: curve di prestazione del Minuetto.....	57
Figura 22: curve di prestazione del Minuetto nella direzione Saluzzo - Savigliano.....	58
Figura 23: curve di prestazione del Minuetto nella direzione Saluzzo – Savigliano.....	62
Figura 24: curve di prestazione del treno a idrogeno.....	66

Figura 25: curve di prestazione del treno a idrogeno nella direzione Savigliano – Saluzzo	67
Figura 26: curve di prestazione del treno a idrogeno nella direzione Saluzzo – Savigliano	70
Figura 27: curve di prestazione del tram pesante	73
Figura 28: curve di trazione del tram pesante nella direzione Savigliano – Saluzzo	74
Figura 29: forza di frenatura relativa al tram pesante	76
Figura 30: diagramma del moto del tram nella direzione Savigliano - Saluzzo	77
Figura 31: curve di prestazione del tram in direzione Saluzzo - Savigliano	79
Figura 32: diagramma del moto del tram nella direzione Saluzzo - Savigliano	81
Figura 33: parametri utilizzati in Electre II	94
Figura 34: valori di input in Electre II	95
Figura 35: risultati ottenuti da Electre II	96
Figura 36: soluzione finale del metodo Electre II	97
Figura 37: input di Electre II con la seconda combinazione dei pesi	98
Figura 38: output di Electre II con la seconda combinazione dei pesi	99
Figura 39: soluzione grafica ottenuta con la seconda configurazione dei pesi	100
Figura 40: input di Electre II con la terza configurazione dei pesi	101
Figura 41: output di Electre II riferiti allo scenario futuro	102
Figura 42: preordine finale dello scenario futuro	103
Figura 43: flusso giornaliero nel mese di novembre da Savigliano a Saluzzo e viceversa	105

Indice delle tabelle

Tabella 1: dati sulla linea a confronto	26
Tabella 2: classificazione dei sistemi Tram-treno	29
Tabella 3: sistemi tram-treno presenti nel mondo	36
Tabella 4: coefficienti della formula di Von Rockl	50

Tabella 5: gradi di prestazione	55
Tabella 6: integrazione tabellare con Minuetto in direzione Savigliano - Saluzzo	59
Tabella 7: consumi relativi al Minuetto nella tratta Savigliano - Saluzzo	60
Tabella 8: valori di riferimento per la fase di regime in direzione Savigliano - Saluzzo	61
Tabella 9: caratteristiche principali ottenute	61
Tabella 10: integrazione tabellare con Minuetto in direzione Saluzzo - Savigliano	63
Tabella 11: consumi relativi al Minuetto nella tratta Saluzzo - Savigliano	63
Tabella 12: valori di riferimento per la fase di regime in direzione Saluzzo - Savigliano	64
Tabella 13: caratteristiche principali ottenute	64
Tabella 14: integrazione tabellare con treno a idrogeno in direzione Savigliano - Saluzzo.....	67
Tabella 15: consumi relativi al treno a idrogeno nella tratta Savigliano - Saluzzo	68
Tabella 16: valori di riferimento per la fase di regime in direzione Savigliano - Saluzzo	69
Tabella 17: caratteristiche principali ottenute con il treno a idrogeno nella direzione Savigliano - Saluzzo	69
Tabella 18: integrazione tabellare con treno a idrogeno in direzione Saluzzo - Savigliano.....	70
Tabella 19: consumi relativi al Minuetto nella tratta Saluzzo - Savigliano	71
Tabella 20: valori di riferimento per la fase di regime in direzione Saluzzo - Savigliano	71
Tabella 21: caratteristiche principali ottenute	72
Tabella 22: integrazione tabellare con tram pesante in direzione Savigliano - Saluzzo	74
Tabella 23: consumi relativi al treno a idrogeno nella tratta Savigliano - Saluzzo	75
Tabella 24: integrazione tabellare in fase di frenatura del tram pesante	76
Tabella 25: valori di riferimento per la fase di regime in direzione Savigliano - Saluzzo	77

Tabella 26: caratteristiche principali ottenute con il tram pesante nella direzione Savigliano - Saluzzo	78
Tabella 27: integrazione tabellare con tram pesante in direzione Saluzzo - Savigliano	79
Tabella 28: consumi relativi al treno a idrogeno nella tratta Saluzzo - Savigliano	80
Tabella 29: integrazione tabellare in fase di frenatura del tram pesante	80
Tabella 30: valori di riferimento per la fase di regime in direzione Savigliano - Saluzzo	81
Tabella 31: caratteristiche principali ottenute con il tram pesante nella direzione Savigliano - Saluzzo	82
Tabella 32: insieme delle alternative considerate in AMC	91
Tabella 33: descrizione dei criteri considerati in AMC	91
Tabella 34: matrice utilizzata nella AMC con Electre II.....	93
Tabella 35: dati di input utilizzati per valutare uno scenario futuro.....	102
Tabella 36: numero di passeggeri giornaliero del servizio ferroviario.....	105
Tabella 37: consumi energetici a confronto	107

1. PANORAMA FERROVIARIO ITALIANO

1.1. *Introduzione*

La ferrovia risulta fin da subito – dalle sue origini, così come oggi giorno - un mezzo vincente sui grandi numeri, essendo considerata come un sistema energeticamente efficiente e con minore impatto ambientale (es. kWh/passeggero per km, emissioni locali inquinanti) rispetto a quasi tutte le alternative modali, se si eccettuano gli impianti a fune; la caratteristica principale è quella di trasportare grandi masse per lunghe distanze in tempi brevi oppure compensare con una frequenza elevata distanze più brevi (es. sistemi metropolitani). Inoltre è un mezzo che, a parità di energia impegnata, trasporta un numero nettamente maggiore di persone rispetto ad autobus o auto private (Figura 1):

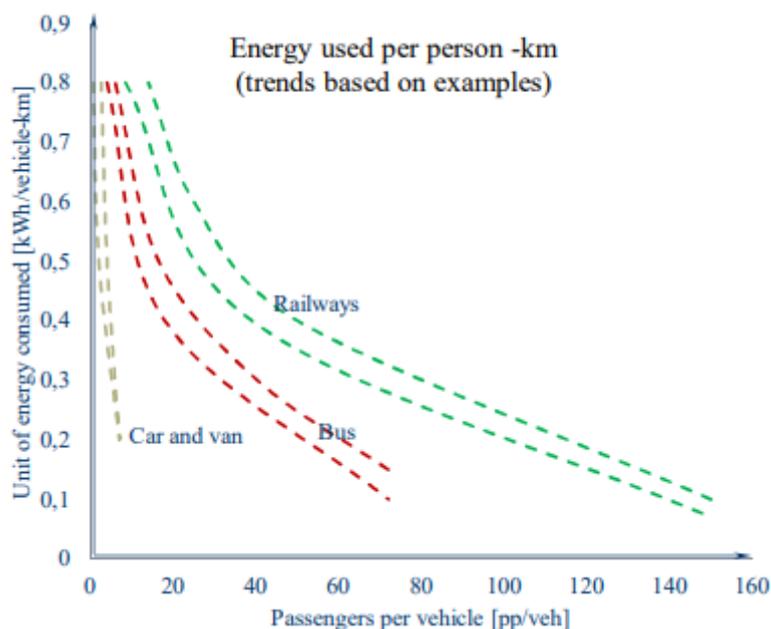


Figura 1: energia consumata per passeggero per km [1]

Laddove le distanze non sono elevate si può dunque operare con sistemi ad alta frequenza, come ad esempio le metropolitane o sistemi tramviari.

Una prerogativa attuale dei treni è raggiungere più alte velocità rispetto al passato: in questa direzione, la ferrovia è già connotata come il mezzo terrestre più veloce, insieme alla levitazione

magnetica, che tuttavia soffre di limiti sull'interoperabilità e suoi consumi energetici specifici. L'aumento di velocità si scontra talvolta tuttavia con il soddisfacimento del territorio, infatti aumentare la velocità significa selezionare "nodi", lasciando al di fuori delle fermate città di medie e piccole dimensioni, il che può comportare una perdita di domanda, se non soddisfatta con reti ferroviarie di adduzione alla rete di livello superiore, in termini di velocità. Pertanto, nel pensare ai sistemi di trasporto moderni, si deve dedicare la dovuta attenzione all'unire sì le maggiori città ma al contempo mantenere la vitalità del territorio circostante attraverso reti gerarchiche più basse, servite con un sistema ferroviario locale; in questo senso risultano di grande aiuto le linee ferroviarie secondarie e risulta utile intervenire su di esse in modo da rimanere al passo con i tempi, così che possano diventare "attrattori di domanda".

Fin dai primi anni dell'800, in Italia come negli altri Paesi, si fece largo il grande affare che costituivano le ferrovie, viste da un lato come grande novità dal forte impatto economico e sociale, dall'altro con diffidenza e preoccupazione da chi guardava il nuovo con occhio sospetto [2]. L'interesse verso il mondo ferroviario arrivò in Italia intorno agli anni '20, grazie a quella parte di borghesia attenta al progresso e costantemente aggiornata sulle nuove opportunità economiche; ciò che però prevalse negli Stati Italiani era la mancanza di capitali per la costruzione delle nuove linee, che pertanto provennero quasi interamente dall'estero [2].

Il primo breve tratto ferroviario in Italia fu commissionato dal Re Ferdinando II delle Due Sicilie e inaugurato il 3 *ottobre* 1839; esso collegava Napoli con Portici, per una lunghezza totale di 7,25 *km* [3], ma vista la piccola estensione della linea, si trattò sostanzialmente di un evento coraggioso ma simbolico, senza alcuna finalità economica [2].

Quello che mancò inizialmente in Italia fu la piena consapevolezza del potenziale che avevano le ferrovie, dal punto di vista economico ma anche come fattore di industrializzazione. Il primo a intuirne l'effettiva importanza come potente stimolo per l'economia, la civiltà ed il progresso [2], fu Camillo Benso conte di Cavour il quale, grazie all'esperienza maturata all'estero, guardava con entusiasmo il modello offerto dall'Inghilterra, dove già l'utilizzo della ferrovia era ampiamente consolidato. Ma l'intuizione più grande che ebbe Cavour fu quella di vedere il binario ferroviario

come elemento di unificazione già negli anni '40, in un contesto quindi ancora lontano dall'unificazione del Paese.

A seguire, anche gli altri Regni cominciarono a muoversi nella stessa direzione: il Regno Lombardo Veneto, soggetto all'Impero Austriaco, commissionò una linea ferroviaria che collegasse Milano e Venezia; questa fu inaugurata nel 1842 e oggi rappresenta una delle linee ferroviarie italiane più importanti.

Uno dei problemi che si riscontrò in Italia fu l'orografia della penisola: la vasta presenza di montagne e i pochi spazi pianeggianti non permisero da subito di costruire lunghi tratti, e sempre con non poche difficoltà. La prima vera sfida tecnica fu rappresentata dalla linea Torino – Genova, che richiese l'ausilio degli ingegneri britannici, in quanto le conoscenze in materia in Italia erano ancora troppo deboli [2]; venne inaugurata il 18 *dicembre* 1853 e comprendeva il primo vero tratto di montagna realizzato in territorio italiano [2].

La grande epoca delle ferrovie di montagna in Italia si chiude con l'inaugurazione, nel 1934, della Direttissima Bologna – Firenze, alla quale si ispirarono costruttori di linee ferroviarie ovunque nel mondo [2], in quanto la galleria dell'Appennino era la seconda del mondo come lunghezza.

Oggi, la rete ferroviaria italiana consta di 16782 km di rete attualmente in esercizio, gestita dalla società Rete Ferroviaria Italiana (RFI). Essa è costituita da diverse linee, classificate in base alle loro caratteristiche in [4]:

- **Linee fondamentali**, caratterizzate da alta densità di traffico ed elevata qualità dell'infrastruttura; sono elettrificate per tutta la loro estensione e comprendono le direttrici internazionali e gli assi di collegamento tra le principali città italiane;
- **Linee complementari**, caratterizzate da minori livelli di densità di traffico e per lo più non elettrificate; costituiscono il collegamento tra i bacini regionali e connettono fittamente tra loro le direttrici principali;
- **Linee di nodo**, che si sviluppano all'interno di grandi zone di scambio e collegamento tra linee fondamentali e complementari situate nell'ambito di aree metropolitane.

I dati specifici sono di seguito riportati:

La rete RFI in cifre	
LINEE FERROVIARIE IN ESERCIZIO (1)	16.782
CLASSIFICAZIONE	
Linee fondamentali	6.468 km
Linee complementari	9.364 km
Linee di nodo	950 km
TIPOLOGIA	
Linee a doppio binario	7.732 km
Linee a semplice binario	9.050 km
ALIMENTAZIONE	
Linee elettrificate	12.065 km
- Linee a doppio binario	7.656 km
- Linee a semplice binario	4.409 km
Linee non elettrificate (diesel)	4.717 km

Figura 2: classificazione della rete RFI in cifre [4]

Nella prima metà del XX secolo la rete ferroviaria raggiunse il suo completamento su tutto il territorio italiano: è nel 1905 che infatti nasce l'azienda Ferrovie dello Stato che sancisce fin da subito il criterio dell'unificazione; era di fatto presente una prima disomogeneità in termini di scartamento, in quanto solo le linee principali vennero fatte a scartamento ordinario, le altre presentavano scartamento ridotto. Oggi, RFI gestisce l'intera rete a scartamento ordinario.

1.2. *Deverticalizzazione*

In Italia, così come anche nel resto dell'Europa, le Ferrovie sono state da sempre in perdita, come peraltro in genere tutti i servizi cosiddetti "a rete" (quella per l'acqua per eccellenza, s'intende la rete, non la gestione della distribuzione): dalla seconda rivoluzione industriale, dal momento che in Italia non vi erano le industrie siderurgiche, lo stato si è indebitato con gli altri paesi per comprare l'acciaio, specialmente con l'Inghilterra. Inoltre, le grandi spese di investimento iniziale e le necessarie spese di manutenzione delle infrastrutture e dei rotabili, non potevano essere sostenute da nessuna impresa privata con i soli ricavi da traffico. Le ferrovie vengono pertanto nazionalizzate dallo Stato: essendo sempre in perdita, nessun privato se ne poteva prendere in carico; si è così creato

il monopolio legale sotto l'autorità pubblica. Per risolvere questo problema che gravava su tutta l'Europa, si è pensato di andare a rivedere la teoria economica, ovvero cercare di capire quali fossero le cause di questo monopolio.

Nel 1991, con la direttiva CEE numero 440, si ebbe una riorganizzazione del sistema ferroviario europeo che mirava ad avere la concorrenza anche in questo settore, al fine di sopperire al fatto che le ferrovie nascevano come monopolio naturale, in maniera inevitabile; le cause di questo monopolio sono da ricercarsi in diversi fattori, primi fra tutti [5] quelli che seguono.

- La struttura dei costi: esistono infatti forti economie di scala, dovute agli alti costi fissi di investimento. Considerando le ferrovie come complesso di infrastruttura e servizi (veicoli che viaggiano sull'infrastruttura), la struttura dei costi fa sì che sia impossibile avere forme di concorrenza perfetta. Questo è impossibile in tutti i paesi occidentali, ad eccezione dei paesi dell'estremo Oriente (ex: Tokyo), dove la dimensione del mercato è tale per cui le economie di scala non siano così forti rispetto alla domanda.
- Le economie di scopo: è possibile utilizzare gli stessi fattori di produzione (che si individuano in: terra, capitale, lavoro) per produrre beni e servizi diversi, come ad esempio il trasporto passeggeri e il trasporto merci. Più sono forti, più si riesce a produrre beni/servizi diversi utilizzando le stesse risorse. Si dice infatti che le imprese di trasporto ferroviario sono *multiprodotto*.
- L'importanza del ruolo svolto dall'infrastruttura: non si può infatti modificare il mix dei fattori di produzione, esso è fisso, perché si ha bisogno dell'infrastruttura attrezzata in un certo modo; inoltre, anche la manodopera non può essere facilmente cambiata, cosa che invece si può fare in un mercato concorrenziale.
- L'indivisibilità degli input e degli output: infatti, aggiungere o togliere una Carrozza in una composizione è un'indivisibilità molto pesante, in quanto potrebbe aumentare o diminuire il livello di produzione solo del 3/5%.
- La natura pubblica del servizio ferroviario.

- La presenza di esternalità, quindi di costi esterni, nel sistema dei trasporti nel suo complesso.

Gli ultimi due aspetti sanciscono la nascita del MONOPOLIO LEGALE.

Pertanto, si è pensato di dividere la funzione del trasporto ferroviario in due aspetti distinti:

- Costruzione e gestione dell'infrastruttura, caratterizzata ancora da forti economie di scala;
- Produzione del servizio di trasporto, tramite l'utilizzo dell'infrastruttura. Anche in questo caso vi sono economie di scala, in quanto i mezzi hanno un prezzo non indifferente, ma comunque in misura inferiore rispetto al primo aspetto.

Questa divisione è l'unico modo che si ha per far sì che anche il mercato ferroviario possa essere concorrenziale. Come già detto, la necessità di deverticalizzare nasce dal fatto che la dimensione della domanda di trasporto ferroviario è tale per cui le economie di scala sono ancora molto forti.

La prima funzione si è pensato di lasciarla in mano al pubblico, quindi si parla di monopolio in mano del pubblico, gestito da RFI, mentre la parte di gestione e produzione del servizio veniva messa a mercato. Per il secondo punto occorre abbattere le barriere per accedere al mercato. Oggi, chi si occupa della produzione del servizio è Trenitalia, che può rimanere sotto il dominio pubblico ma non può essere un monopolio. Dal momento che entrambe le aziende sono sotto il dominio pubblico, è nata la holding Ferrovie dello Stato, che è una società solo a scopi finanziari, non produttivi, sotto il controllo del ministro del tesoro.

Il servizio che Trenitalia deve produrre deve essere contendibile, perché appunto non può essere un monopolio, anche se in realtà il vecchio monopolista (detto Incumbent) ha dei privilegi sugli altri produttori del servizio, che nascono dal fatto di essere arrivato per primo. Le imprese che usufruiscono dell'infrastruttura devono pagare al gestore dell'infrastruttura un corrispettivo chiamato "canone di accesso" (o pedaggio): è una tariffa decisa dal pubblico, tendenzialmente al costo medio. In questo modo si abbattano le barriere di accesso al mercato e qualunque produttore del servizio (come ad esempio avviene con Italo, per l'alta velocità) può affacciarsi al mercato. Questo canone si compone di [5]:

- Diritti fissi, che è una quantità fissa da corrispondere per ogni linea che viene percorsa da un treno e per ogni nodo che viene attraversato; questi diritti variano a seconda che ci si trovi sulla rete fondamentale, sulla rete complementare o su quella secondaria.
- Costo al km, variabile con l'effettiva lunghezza della tratta attraversata;
- Costo al minuto, per la permanenza all'interno di ciascun nodo.

1.3. Rete ferroviaria piemontese

La regione Piemonte presenta un'ampia rete ferroviaria, grazie a Cavour ma anche grazie ad un ambiente molto reattivo, caratterizzato da una proficua articolazione tra pubblico e privato [2].

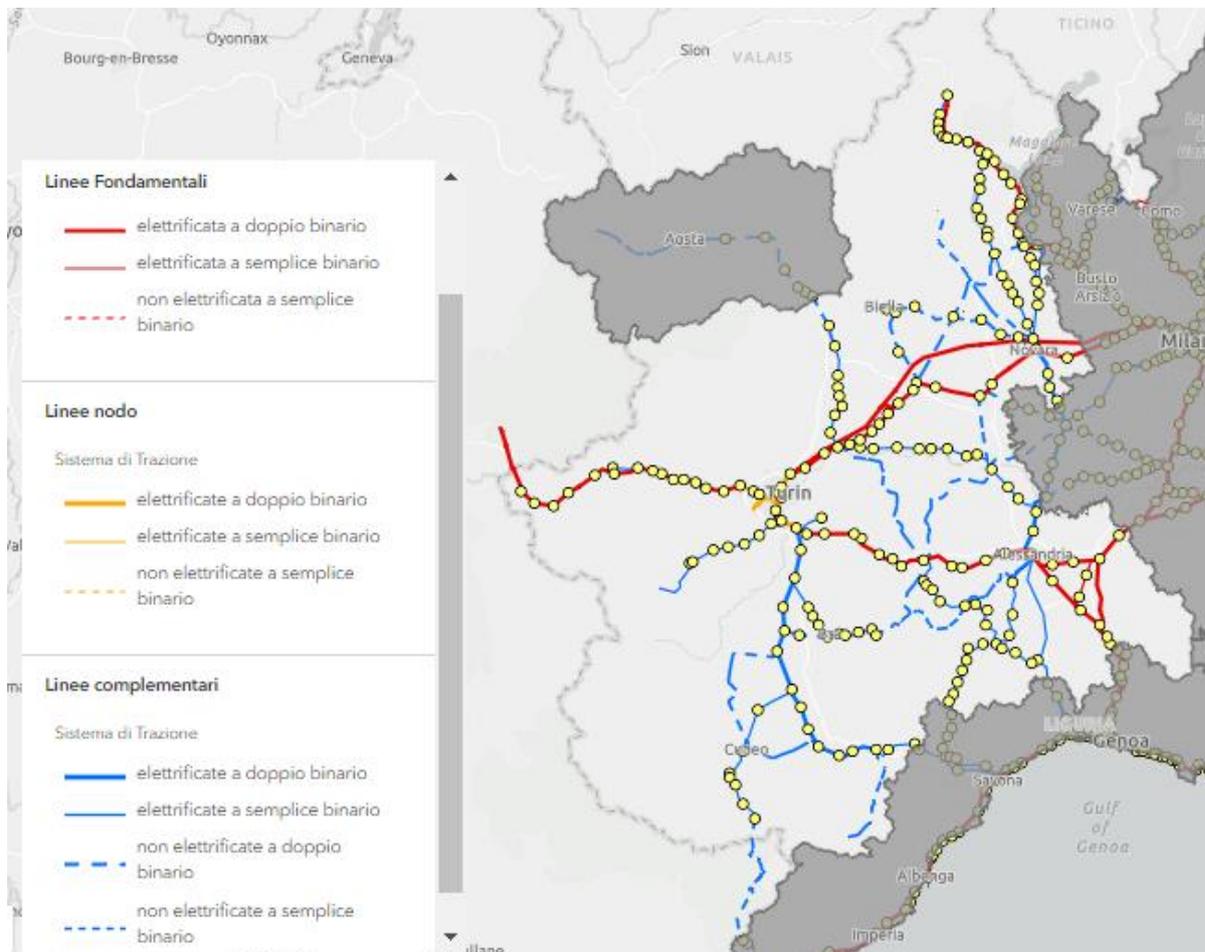


Figura 3: suddivisione della rete ferroviaria in Piemonte [4]

Come è possibile osservare dall'immagine sopra riportata, la rete ferroviaria piemontese, oltre alla linea principale, presenta una fitta rete di linee complementari, diversamente rispetto a quanto accade in altre regioni italiane: essa infatti rappresenta il 66% di tutta la rete regionale.

I dati numerici sono di seguito riportati [4]:

Piemonte - la rete RFI in cifre	
LINEE FERROVIARIE IN ESERCIZIO	1.896 km
CLASSIFICAZIONE	
Linee fondamentali	556 km
Linee complementari	1.256 km
Linee di nodo	84 km
TIPOLOGIA	
Linee a doppio binario	761 km
Linee a semplice binario	1.135 km
ALIMENTAZIONE	
Linee elettrificate	1.344 km
- Linee a doppio binario	761 km
- Linee a semplice binario	583 km
Linee non elettrificate (diesel)	552 km

Figura 4: classificazione in cifre della rete ferroviaria piemontese [4]

1.4. Storia delle linee ferroviarie secondarie a scarso traffico

Da un po' di tempo si è diffusa la locuzione "taglio dei rami secchi", ad indicare appunto il taglio delle linee secondarie non produttive, definite quindi come rami secchi; ci si riferisce a quelle linee secondarie che hanno un bacino di utenza così ridotto da non giustificare la continuazione dell'esercizio ferroviario, che risulta dunque troppo oneroso e non produttivo, anzi al contrario esse sono viste come servizi che assorbono troppe risorse senza poi apportare benefici per la collettività. Spesso quindi i tagli avvengono in maniera quasi naturale, senza suscitare scalpore o pretese da parte dei pochi utenti interessati al servizio. Talvolta, dietro questi tagli, vi è la pressione degli enti pubblici che preferiscono utilizzare gli spazi destinati a queste ferrovie come spazi da adibire al verde, oppure dove realizzare piste ciclabili o parcheggi [6]. È questo, a titolo di esempio, il caso della linea

ferroviaria Airasca – Saluzzo, chiusa al traffico nel 1986 in quanto svolgeva un servizio sia passeggeri che merci limitato, nonostante fosse stato rifatto da poco l'armamento; oggi, almeno in parte, è stata disarmata e convertita in una pista ciclabile che corre al posto del binario ferroviario tra Airasca e Villafranca Piemonte, da qui poi fino a Moretta è presente un sentiero sterrato, mentre da Moretta a Saluzzo la sede ferroviaria è ancora armata in quanto viene utilizzata dalle le tradotte merci per le officine di Moretta [7].

Vi sono state al contrario altre situazioni dove la voce del comune e degli abitanti soprattutto, non sia stata affatto d'accordo con il taglio di suddette linee, anzi al contrario questi tagli hanno generato situazioni di protesta e malcontenti. È il caso della linea Saluzzo – Savigliano, la cui chiusura ha visto scendere in piazza anche i primi cittadini di tutti i paesi interessati, ma nemmeno tali proteste hanno impedito la chiusura della linea al traffico passeggeri.

I primi tagli alle ferrovie avvengono intorno agli anni '30 del secolo scorso, ma è dopo la seconda guerra mondiale che si assiste ad un più radicale cambiamento: gli eventi bellici distrussero la rete ferroviaria per il 60%, mentre il parco rotabili fu distrutto per oltre il 70% [8]. Gran parte della rete ferroviaria fu ricostruita in fretta per riattivare il servizio al più presto, per un'altra parte caratterizzata da scarsa frequentazione, non fu effettuata la ricostruzione [6].

Inoltre, in seguito alla sempre crescente motorizzazione di massa degli anni '50, si cominciarono a vedere le prime soppressioni di molte linee ferroviarie, il cui servizio era stato sopperito dall'utilizzo dell'auto privata. Si proseguì poi con il taglio, negli anni '60, delle reti ferroviarie a scartamento ridotto, per arrivare poi negli anni '80 con i tagli più onerosi: è in questi anni che le Ferrovie dello Stato diventano un Ente e si comincia a pensare ad un piano d'investimenti che potesse modernizzare le ferrovie portandole al passo con i tempi, ma al tempo stesso era necessario risparmiare laddove fosse stato possibile. Pertanto Claudio Signorile, ministro dei trasporti del governo Craxi, fece redigere un elenco di "linee non comprese nella rete di interesse generale", in cui venivano elencate tutte le ferrovie improduttive il cui taglio avrebbe portato solamente ad un beneficio e risparmio collettivo. L'elenco delle linee interessate dalla chiusura tra il 1985 e il 1986 è di seguito riportato [6]:

Pinerolo - Torre Pellice; Biella - Santhià; Cantalupo - Cavallermaggiore; Biella - Novara; Asti - Casale; Savigliano - Saluzzo; Bussoleno - Susa; Cava Carbonara - Torreberetti; Vignale - Varallo; Asti - Chivasso; Aosta - Prè St. Didier; Bastia - Mondovì ; Ceva - Ormea; Trofarello - Chieri; Airasca - Saluzzo - Cuneo; Asti - Castagnole delle Lanze; Colico - Chiavenna; Monza - Molteno; Varese - Porto Ceresio; Albate C. - Lecco; Schio - Vicenza; Bassano - Cittadella - Camposanpiero; Legnago - Rovigo - Chioggia; Ponte nelle Alpi - Conegliano; Dossobuono - Cerea ; Merano/Meran - Mals/Malles ; Fidenza - Salsomaggiore; Granarolo - Lugo - Lavezzola; Faenza - Granarolo - Russi; Albacina - Civitanova; Ascoli - Porto d'Ascoli; Siena - Buonconvento - Monte Antico; Termoli - Boscoredole; Sulmona - Carpinone; Attigliano - Viterbo; Fano - Urbino; Pergola - Fabriano; Teramo - Giulianova; Cecina - Saline di Volterra; Poggibonsi - Colle Val d'Elsa; Roccasecca - Avezzano; Foggia - Manfredonia; Margherita di Savoia - Ofantino; Torre Annunziata - Gragnano; Barletta - Spinazzola; Sicignano - Lagonegro; Cancellò - Torre Annunziata; Avellino - Rocchetta S.A.L.; Priverno - Terracina; Alcamo - Castelvetro - Trapani; Caltagirone - Gela (aperta nel 1980); Canicattì – Siracusa; Randazzo – Alcantara; Noto – Pachino; Castelvetro – Ribera; Motta Sant'Anastasia – Regalbuto; Iglesias – Villamassargia.

Alcune delle linee sopra citate erano tutt'altro che prive di traffico, pertanto grazie alle proteste degli utenti i tagli furono sospesi su alcune di esse e venne analizzata attentamente ogni linea.

Ma il colpo più duro che subì la regione Piemonte avvenne a giugno del 2012, quando vennero chiuse ben 12 linee considerate ormai inefficienti e i cui ricavi erano troppo inferiori di quanto si spendesse per l'esercizio. Venne quindi soppresso il servizio ferroviario su 460 km, pari al 24% della rete ferroviaria piemontese [9]; le linee interessate alla chiusura sono di seguito riportate:

1. Alba - Asti,
2. Alba - Alessandria,
3. Asti – Casale - Mortara,
4. Cuneo - Mondovì,
5. Cuneo – Saluzzo - Savigliano,

6. Novi - Tortona,
7. Alessandria - Ovada,
8. Casale - Vercelli,
9. Santhià - Arona,
10. Pinerolo - Torre Pellice,
11. Chivasso - Asti,
12. Ceva - Ormea.

1.5. Cause che hanno portato all'inutilizzo delle linee secondarie

Non è facile stabilire i motivi che hanno portato al quasi inutilizzo di alcune linee; certamente, la scarsa densità demografica di alcuni dei luoghi limitrofi alle stazioni in questione è tra i principali fattori, ma per capire come si è evoluta la domanda di trasporto, è necessario capire come è cambiata la distribuzione della popolazione nel mondo. Fino agli anni 2005-2006 era prevalente la popolazione rurale, in Europa così come nel resto del mondo, intorno al 2008 si assiste ad un cambiamento: in tale anno, il 73% della popolazione è urbana, ovvero 3 persone su 4 vivono in città [1]:

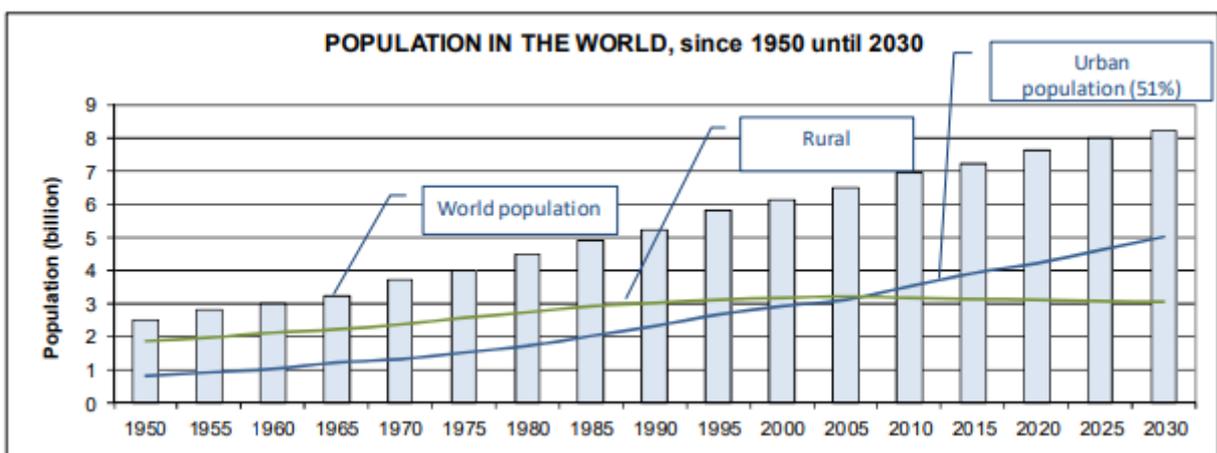


Figura 5: popolazione nel mondo [1]

L'urbanizzazione è vista come fonte di sviluppo globale e inclusione sociale, nonché come apertura allo sviluppo sostenibile. Dall'altro lato è necessario considerare altri due aspetti che si ricollegano

a questo fenomeno, e che sono probabilmente tra le vere cause della perdita di importanza delle ferrovie secondarie: il tasso di motorizzazione e il fenomeno della città diffusa o “urban sprawl”.

Con tasso di motorizzazione si intende il numero di automobili ogni 1000 abitanti, l’Italia è il secondo Paese dopo il Lussemburgo ad avere il tasso maggiore:

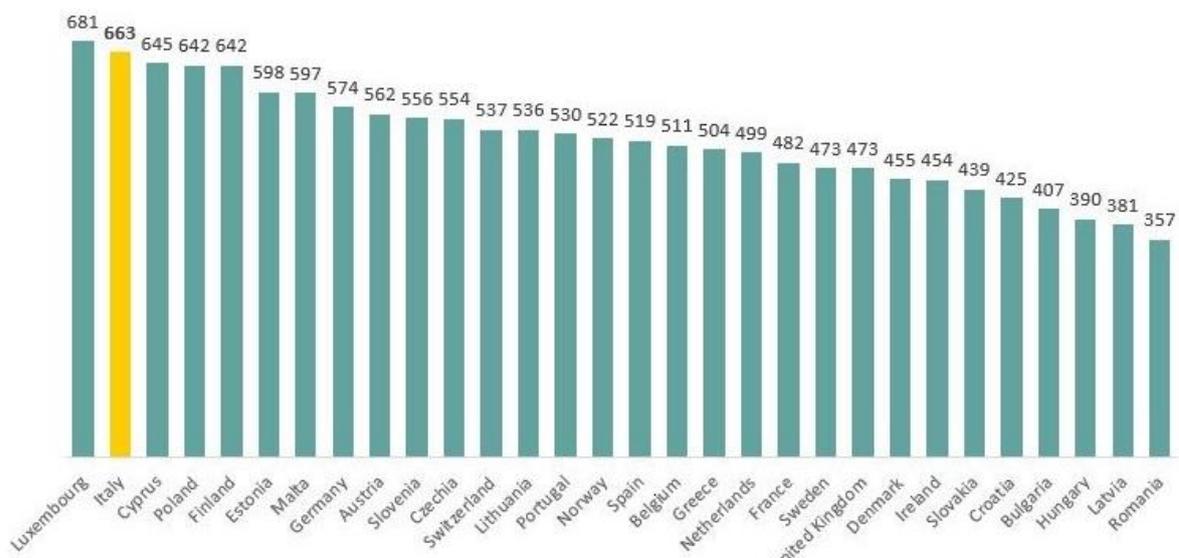


Figura 6: autovetture per 1000 abitanti in Europa, anno 2019 [10]

In passato, il tasso di motorizzazione era un indicatore associato in senso positivo allo standard di vita di un Paese, oggi invece è considerata come una misura indiretta dell’impatto negativo che si ha per l’ambiente, oltre a far aumentare il problema della congestione [11]. Pertanto oggi si mira a diffondere la cosiddetta “mobilità dolce”, caratterizzata per lo più da spostamenti a piedi o in bicicletta, oppure si cerca di promuovere servizi di “car sharing”, effettuati con autovetture elettriche e poco inquinanti, in modo da disincentivare l’acquisto e quindi il frequente utilizzo dell’auto privata. Il secondo fenomeno sopra citato è strettamente collegato alla motorizzazione di massa: prende il nome di “Urban sprawl”, che letteralmente significa espansione urbana (talvolta si parla anche di “città diffusa”); tale fenomeno indica in generale l’espansione della città urbana, con conseguente diminuzione della densità. Esso può assumere diverse forme: può comportare lo sviluppo di aree residenziali a bassa densità, chiamate anche “città di confine”, nelle quali vengono localizzate attività

di commercio, di consumo, uffici; può assumere la forma di piccole comunità pianificate che hanno il proprio centro città, o sono vicine a parchi o laghi; infine, può caratterizzarsi come la presenza di case singole in paesaggi rurali [12]. Questo fenomeno è strettamente collegato anche con quello dell'urbanizzazione; un modo comune per documentare l'espansione urbana è quello di considerare livelli diversi, dapprima considerare la popolazione urbana e quella rurale, poi considerare all'interno delle aree urbane l'evolversi del rapporto tra aree periferiche e centro città.

È chiaro che in un simile contesto, lo spostamento con l'auto privata viene privilegiato su qualsiasi altro mezzo di spostamento, infatti la diffusione del fenomeno ha reso difficile se non quasi impossibile la creazione di un sistema di trasporto che possa servire capillarmente ed efficacemente tutto il territorio.

1.6. Linea ferroviaria Savigliano – Saluzzo – Cuneo

La linea ferroviaria Savigliano – Saluzzo – Cuneo è costituita dall'unione di due infrastrutture, realizzate in tempi diversi: la prima tratta Savigliano – Saluzzo, lunga 14,8 km, è stata inaugurata nel 1857, mentre la seconda tratta Saluzzo – Cuneo, lunga 32,6 km, venne realizzata nel 1892 (AMP¹: Studio ferroviario linea Savigliano – Saluzzo Cuneo). Il 1° gennaio 1857 fu aperta all'esercizio con tre coppie di treni giornalieri e con tempo medio di percorrenza di 20 minuti.

La linea è interamente a unico binario e non elettrificata, lunga in totale 49 km.

Dal 2012, in seguito ai tagli avvenuti nella regione Piemonte su diverse tratte ferroviarie, anche la linea in questione ha subito la chiusura del trasporto passeggeri; pertanto, dal 2012 al 2018, è stata interessata solamente dal traffico merci. In seguito alla sospensione del servizio, sono state

¹ AMP: Agenzia della Mobilità Piemontese. L'Agenzia della Mobilità piemontese è il consorzio costituito ai sensi dell'art. 8 della L.R. 1/2000 e ss.mm.ii. per l'esercizio in forma obbligatoriamente associata di tutte le funzioni, trasferite o delegate, in materia di trasporto pubblico locale, degli enti soggetti di delega ex L.R. 1/2000. Lo Statuto dell'Agenzia della Mobilità Piemontese prevede, all'articolo 3, che il consorzio assume tutte le funzioni trasferite o delegate in materia di trasporto pubblico locale, conformemente alla programmazione regionale e con le risorse messe a disposizione dalla Regione, degli Enti aderenti in ambito regionale.

riorganizzate due linee di bus gestite da Bus Company: la linea 97 Savigliano – Saluzzo, e la linea 91 Saluzzo – Cuneo.

Il 7 *gennaio* 2019, nel solo tratto Savigliano – Saluzzo, la linea è stata riaperta al servizio viaggiatori, per poi essere nuovamente sospesa a dicembre dell'anno successivo.

Per la riapertura del 2019 era stato organizzato un servizio congiunto tra autobus e treno, in collaborazione con Bus Company, per la tratta Savigliano – Saluzzo: nella fascia oraria mattutina, indicativamente tra le 6:00 e le 9:00, erano presenti 4 coppie di treni, insieme a tre corse di autobus; nella fascia oraria successiva, fino alle 16:00 le corse erano effettuate solo da autobus; infine, dalle 16:00 alle 19:00 di nuovo il servizio era svolto da 4 coppie di treni e tre corse di autobus. Questo servizio così strutturato era effettuato dal lunedì al venerdì, mentre al sabato e ai festivi le corse erano lasciate solo agli autobus.

Il servizio che invece veniva effettuato fino al 2012 prevedeva tre corse in più, andando a coprire anche la fascia pomeridiana dalle 13:00 alle 16:00.

Vengono di seguito riportati gli orari grafici relativi ai diversi anni di attività del servizio, 2012 e 2019:

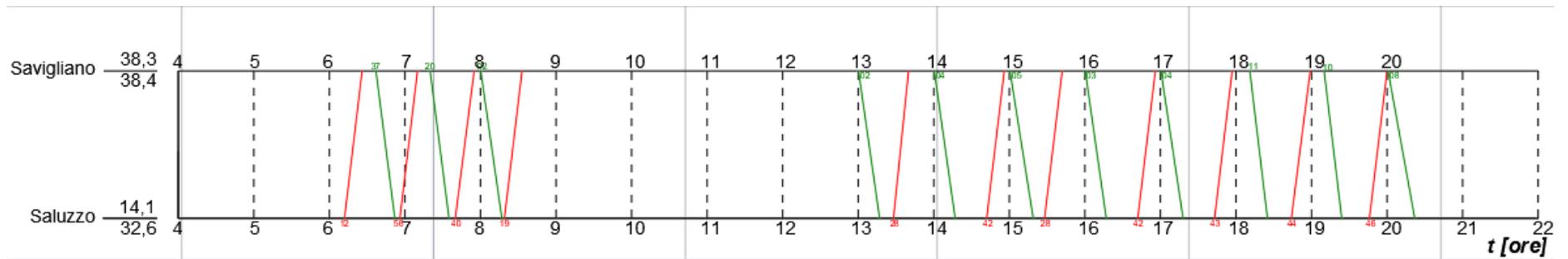


Figura 7: orario grafico del servizio svolto fino al 2012

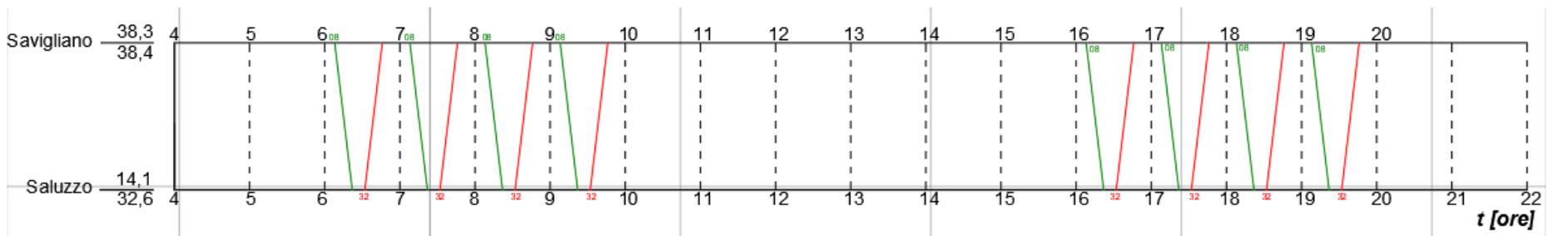


Figura 8: orario grafico del servizio svolto nel 2019

I dati di frequentazione della linea sono stati forniti dall’Agenzia della mobilità piemontese; vengono riportati di seguito:

Tabella 1: dati sulla linea a confronto

	2012	2019
Treni al giorno	22	16
Numero di utenti al giorno	430	481
Passeggeri per treno	20	30

Si può osservare come nel 2019, nonostante il servizio sia stato affiancato dalla linea di autobus, il numero di passeggeri al giorno sia aumentato.

Dalle analisi condotte dall’AMP sulle linee ferroviarie del Piemonte il cui servizio è stato sospeso nel periodo 2010-2013, non risultano necessari interventi infrastrutturali per il ripristino del servizio nella linea in questione, che pertanto può essere ripreso in qualsiasi momento.

2: STATO DELL'ARTE

2.1. Inquadramento generale del sistema tram - treno

I sistemi a guida vincolata in ambito locale, per loro natura, sono caratterizzati da modesta capienza, elevata frequenza e basso impatto ambientale, essendo generalmente alimentati da trazione elettrica. Essi sono caratteristici di città di medie dimensioni e non eccessiva domanda di trasporto, non essendo infatti giustificati mezzi più onerosi come le metropolitane, volti invece a servire una elevata domanda di trasporto, propria delle città di grandi dimensioni.

Tuttavia, un sistema di trasporto innovativo e ancor più frequente, diventa esso stesso attrattore di domanda; in tal senso, il sistema tram-treno risulta efficace per servire una domanda di trasporto crescente, grazie alla sua interoperabilità che gli consente di viaggiare su sedime tramviario così come su regime ferroviario. Tale aumento di domanda è da intendersi in relazione al fatto che, un sistema di questo tipo, risulta essere in grado di connettere il centro città con l'area extraurbana, in maniera comoda e veloce, evitando di effettuare il trasbordo da tram a treno o viceversa. Grazie alle maggiori prestazioni del tram in accelerazione e frenatura, è possibile raggiungere velocità commerciali maggiori, per cui i tempi di percorrenza risultano sensibilmente ridotti, o comunque, a parità di tempo di percorrenza, il territorio risulta ben servito in quanto è possibile aggiungere in ambito suburbano un numero di fermate maggiore rispetto a quelle che si possono avere con l'esercizio di materiale rotabile tradizionale [13]. Il minor tempo di percorrenza è da attribuirsi anche alla facilità di imbarco dei passeggeri, garantita dall'elevato numero di porte che si riscontrano nei tram e dal fatto che questi ultimi vengono ormai prodotti a pianale ribassato, proprio per facilitare la salita e la discesa dei passeggeri.

Tale sistema risulta inoltre estremamente flessibile, quindi in grado di asserire facilmente ad un aumento o decremento della domanda variando la composizione del tram-treno grazie a sistemi di aggancio automatico.

Infine, un sistema di questo tipo, risulta particolarmente vantaggioso laddove vi siano linee ferroviarie a scarso traffico oppure dismesse: in primo luogo si ha una riduzione dei costi di investimento dovuta al fatto di riutilizzare una infrastruttura già esistente; in secondo luogo, la non interferenza con i veicoli ferroviari, laddove la linea sia dismessa, rende il servizio ancor di più efficace. È chiaro che l'utilizzo di tali sistemi risulta efficace nelle città già dotate di sistema tranviario, altrimenti il costo di costruzione della tranvia è da aggiungere ai costi di investimento iniziale, rientrando tra i costi fissi di costruzione dell'infrastruttura. Tuttavia, anche dove non è presente la linea tranviaria e vi siano delle linee ferroviarie dismesse, un sistema di tipo tram – treno risulta vantaggioso sia per il minor costo del materiale rotabile, che è più leggero, rispetto a quello di un treno tradizionale, sia in un'ottica di espansione e ammodernamento della città, lasciando aperta la possibilità di costruire una tranvia anche in un secondo momento.

Oggi il tram trova successo in diverse città in quanto è un mezzo con poche emissioni, confortevole e performante [14], ma in passato non è sempre stato così: intorno agli anni '60 il tram cominciò ad essere considerato come un mezzo obsoleto, ormai sorpassato da sistemi più moderni, che ostruiva il traffico cittadino, e il cui impatto ambientale rovinava le città europee [14]. In Italia vennero smantellate le reti tranviarie di 22 città, tra cui quella della città di Saluzzo.

Uno dei principali motivi per cui il sistema tram – treno non ha fino ad ora riscosso successo è la mancanza di una normativa univoca, che conciliasse i due sistemi; per tale motivo sono state redatte delle “Linee guida sui sistemi tram-treno” (12/07/2012, ANSF), allo scopo di fornire indicazioni per la progettazione e l'esercizio di tali sistemi.

Lo scenario più adatto che meglio si presta alla realizzazione di tali sistemi è quello di aree ad urbanizzazione diffusa, ovvero contesti regionali con cittadine di medie e piccole dimensioni [14].

2.1.1 Definizione e classificazione

Il tram-treno è un veicolo progettato per circolare principalmente nelle reti tranviarie, ma in grado di circolare anche su rete ferroviaria.

Quando si parla di “sistema tram-treno” in maniera generale, si intende nel suo complesso, il sistema costituito da:

- Veicoli tram-treno;
- Infrastruttura tranviaria;
- Infrastruttura ferroviaria;
- Tram che circolano sull’infrastruttura tranviaria, unitamente ai veicoli tram-treno;
- Veicoli ferroviari che transitano sull’infrastruttura ferroviaria, sulla quale possono circolare anche i veicoli tram-treno.

La classificazione alla quale generalmente si fa riferimento, è relativa alla possibilità di avere congiuntamente veicoli tram-treno e tram o treni che transitano sulla linea; si individuano 3 categorie:

Tabella 2: classificazione dei sistemi Tram-treno

<i>Sistema tram-treno tipo</i> <i>1</i> TT1	<i>Sistema tram-treno tipo</i> <i>2</i> TT2	<i>Sistema tram-treno tipo</i> <i>3</i> TT3
Sistema che comprende un’infrastruttura ferroviaria esercita soltanto con veicoli tram-treno.	Sistema che comprende un’infrastruttura ferroviaria esercita con veicoli ferroviari e veicoli tram-treno in fasce orarie differenti.	Sistema che comprende un’infrastruttura ferroviaria esercita in maniera promiscua con veicoli tram-treno e veicoli ferroviari.

Ogni configurazione presenta una diversa soluzione tecnica e ha costi variabili in base al grado di complessità che si vuole assegnare o presenta già il sistema [15].

Dal momento che la linea ferroviaria in questione è chiusa al traffico passeggeri (ma adibita solo al traffico delle merci), nel seguito si farà riferimento al sistema di tipo 2 (TT2).

2.1.2 Adattamento con la linea ferroviaria: differenze tra i due sistemi

Sebbene l'interoperabilità del veicolo tram – treno costituisca il suo punto di forza, talvolta questa diventa anche una difficoltà: infatti, un tram-treno deve soddisfare i requisiti e le regole di esercizio imposti da entrambi i regimi di circolazione, quello tranviario e quello ferroviario.

Ai sensi del D.P.R. n. 753/1980 i sistemi di sicurezza devono garantire un livello di sicurezza almeno pari a quello dei sistemi ferroviari e tranviari già operanti.

Si riscontrano dunque diversi ostacoli tecnici, derivanti dall'interoperabilità tra i due sistemi; nel seguito verranno elencate le diverse problematiche, cercando di offrire una soluzione per ciascuna di esse.

Scartamento

Una conseguenza intuitiva affinché un sistema interoperabile, concepito come sopra scritto, possa circolare su entrambe le reti, è che esse abbiano il medesimo scartamento. Generalmente questo non avviene, in quanto la rete tranviaria presenta uno scartamento maggiore o minore rispetto a quello standard che si adotta in ferrovia di 1435 *mm*. Per ovviare a questo problema, si può pensare di inserire una terza rotaia, di modo che il veicolo possa transitare in maniera continua su entrambe le infrastrutture. Questa soluzione è stata ampiamente utilizzata in Germania, dove la differenza tra i due scartamenti risulta abbastanza considerevole. Invece in Italia, una soluzione di questo tipo risulterebbe onerosa e poco necessaria, dal momento che la differenza dello scartamento, nelle tranvie principali di Roma, Milano e Torino, risulta essere di appena 10 *mm* (lo scartamento tranviario è di 1445 *mm*). La soluzione proposta deriva da uno studio dell'Università "La Sapienza" di Roma che ha individuato un dispositivo per scartamento variabile, specifico per i carrelli a ruote indipendenti e impiegato sui veicoli tranviari a pianale ribassato [13].

Nel caso in esame il problema viene eliminato alla radice in quanto il sistema tranviario non è presente né a Saluzzo né a Savigliano, ma è totalmente da realizzare.

Alimentazione elettrica

Le due reti tranviaria e ferroviaria presentano una diversa tensione di alimentazione: come sistema di alimentazione di una rete tranviaria, generalmente si utilizza la corrente continua con una tensione che può variare dai 500 ai 700 *volt*; la rete ferroviaria è invece alimentata con una tensione di 3000 *volt*, di nuovo in corrente continua (diversa è l'alimentazione per le reti ad alta velocità). Per la risoluzione di questa problematica è possibile adottare tre soluzioni differenti:

- *Veicoli ibridi*, che viaggiano con motori elettrici sulla rete tranviaria e con motori diesel sulla rete ferroviaria, quando quest'ultima risulta non elettrificata; è la situazione adottata nella città tedesca di Kassel, che utilizza il mezzo *Regio Citadis*² prodotto da Alstom;
- *Veicoli bitensione*, che possono viaggiare su reti alimentate in maniera differente grazie a trasformatori ed inverter di bordo, capaci di rilevare automaticamente il cambiamento di tensione lungo la linea e adattare quindi l'alimentazione dei motori e degli ausiliari [13]; è la soluzione più ampiamente collaudata, scelta per il prototipo tedesco più famoso al mondo, Karlsruhe. Questa soluzione è chiaramente da preferire laddove la linea ferroviaria risulti già elettrificata, in quanto meno inquinante, meno rumorosa e più prestazionale;
- *Veicoli diesel*, anche se in questo caso non si avrebbero molti dei benefici del tram-treno, come ad esempio le migliori prestazioni in accelerazione e frenatura che permettono di aggiungere fermate o di ridurre i tempi di percorrenza, oltre al fatto che questi mezzi sono altamente inquinanti, sia dal punto di vista delle emissioni che dal punto di vista del rumore.

Nel caso in esame la soluzione da considerare è la prima esposta, in quanto la rete ferroviaria in questione non risulta elettrificata, e sebbene non sia presente l'infrastruttura tranviaria, un veicolo ibrido è da preferirsi in un'ottica di possibile costruzione della stessa.

² Veicoli ferroviari leggeri prodotti da Alstom, composti da 3 elementi e con pianale basso sul 70% del convoglio.

Interazione ruota - rotaia

Un'altra problematica da affrontare è legata al fatto che le due infrastrutture, tranviaria e ferroviaria, presentano un armamento differente: le rotaie tranviarie, essendo inserite in un contesto stradale nel quale circolano anche altri veicoli stradali, presentano un particolare profilo a gola stretta, realizzato tipicamente con rotaie Vignole o Phoenix posate senza inclinazione e senza sopraelevazione in curva; le rotaie ferroviarie sono invece realizzate con rotaie Vignole posate con una inclinazione di $1/20$ o $1/40$ (come avviene in Germania) e con sopraelevazione in curva. Di conseguenza, i veicoli per poter interagire con tali infrastrutture, risultano anch'essi differenti tra loro: il diametro delle ruote tranviarie risulta più piccolo di quello delle ruote ferroviarie, seguendo un campo di variazione di $550 \div 750 \text{ mm}$ a nuovo, contro il campo di variazione di $700 \div 1200 \text{ mm}$ in ambito ferroviario; il bordino delle ruote tranviarie risulta più basso e più stretto, proprio per adattarsi alla gola delle rotaie; inoltre, anche la larghezza delle ruote risulta più piccola: 84 mm contro i 135 mm delle ruote ferroviarie. Dunque, il problema principale di interazione ruota-rotaia di un veicolo tranviario circolante in ferrovia è costituito dalla distanza che intercorre fra rotaia e controrotaia di fronte al cuore dei deviatori ferroviari, che non consente un corretto instradamento della ruota tranviaria [13]. Tale problema trova risoluzione nel modello tedesco Karlsruhe, nel quale viene adottato un cerchione di larghezza ferroviaria (135 mm) ma con bordino stretto, e viene rialzata la controrotaia ferroviaria; in questo modo si rende possibile al profilo di viaggiare sui due armamenti differenti.

Tuttavia, non è da sottovalutare la maggiore velocità di usura che raggiunge in questo modo il cerchione considerato, di derivazione più strettamente tranviaria: esso infatti si troverà a dover interagire, oltre che con un armamento differente, anche con tracciati diversi in termini di raggi di curvatura e sopraelevazione in curva. Pertanto, sarà richiesta una manutenzione più frequente.

Nel caso di nuova realizzazione della rete tranviaria è possibile adottare direttamente profili ruota di tipo ferroviario, anche se con questa soluzione è necessario utilizzare rotaie con gola larga 60 mm , impedendo la via alle biciclette per ragioni di sicurezza [14]; è di esempio il caso della città tedesca di Saarbrücken, anche se in Germania vi sono diverse soluzioni di piste ciclabili, talvolta anche

separate dai percorsi pedonali, mentre in altre città non è sempre facile trovare spazi da adibire in tal senso; inoltre, in un momento in cui si spinge ad orientare la domanda di spostamento verso una “mobilità dolce”, una soluzione di tale impatto potrebbe trovare ampi dissensi.

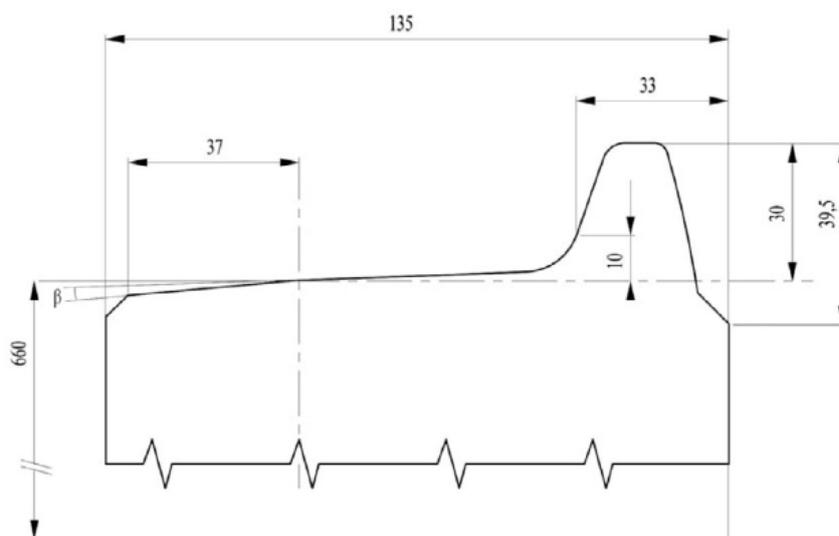


Figura 9: profilo del cerchione adottato a Karlsruhe (quote in mm) [14]

Sagoma del veicolo e accessibilità

I due differenti tipi di veicoli presentano sagome differenti, di conseguenza si riscontrano dei gap in orizzontale e verticale che ostacolano l’accessibilità al veicolo stesso; il tram presenta una larghezza di circa $2,4 \div 2,6 \text{ m}$, mentre il treno generalmente è largo $2,9 \div 3,0 \text{ m}$. Le banchine ferroviarie sono poste ad una distanza dall’asse del binario pari a 1650 mm , e presentano un’altezza variabile tra i $250 \div 600 \text{ mm}$ dal piano del ferro; la maggior parte dei tram oggi presenti in circolazione sono a pianale ribassato proprio per velocizzare le operazioni di entrata/uscita dei passeggeri, pertanto anche in altezza si riscontra un vincolo. Entrambi possono essere risolti mediante adeguamenti sia lato veicolo, utilizzando pedane retrattili e gradini, sia lato infrastruttura: in quest’ultimo caso, gli eventuali adeguamenti dei marciapiedi delle stazioni e delle fermate devono avvenire in conformità alle UNI 7156 e alle UNI 11174. Va ricordato che una delle peculiarità del sistema TT è che possa essere aperto ad ogni categoria di utenza, la rapidità e l’accessibilità al servizio sono fattori di primaria importanza, al fine di garantire una buona qualità e utilizzazione del servizio stesso [14].

Resistenza strutturale dei veicoli

Le normative fissano un diverso valore di resistenza all'urto per i rotabili ferroviari e per quelli tranviari: per i primi, le fiche UIC³ prevedono una resistenza a compressione longitudinale pari a 1500 kN, mentre per i secondi tale resistenza è dell'ordine di circa 200 kN. I veicoli tranviari, per loro natura, richiedono maggiori prestazioni in accelerazione e frenatura rispetto a quelli ferroviari, oltre che una maggiore visibilità per il conducente dal momento che marcano a vista e potrebbero incontrare altri veicoli urbani: è per questo motivo che i veicoli risultano più leggeri e meno resistenti agli urti. Pertanto, pensare di adottare il vincolo ferroviario si tradurrebbe in un appesantimento del veicolo, il che farebbe venir meno le peculiarità proprie del veicolo tranviario. Per ovviare a questo problema, si può incrementare la "sicurezza attiva", ovvero incrementare le notevoli prestazioni in accelerazione e frenatura già proprie del tram: in questo modo si compensa con la riduzione di sicurezza passiva, che si traduce in una struttura più leggera e meno resistente agli urti.

Sicurezza e segnalamento

Il sistema tranviario e quello ferroviario si basano su differenti regole di esercizio: il primo è un sistema a guida vincolata che viaggia su sedime stradale, in maniera promiscua con le autovetture, quindi soggetto al Codice della strada; il secondo è di nuovo a guida vincolata, ma viaggia in sede riservata e la circolazione è regolata da sistemi di segnalamento [14]. Il manovratore del tram, unica persona, attua una marcia a vista, trovandosi in un flusso veicolare che interagisce appunto con altri veicoli; pertanto il distanziamento tra i veicoli è demandato alla scelta del guidatore. In ambito ferroviario invece, dal momento che sono necessari spazi di arresto maggiori e le resistenze che si incontrano sono inferiori rispetto al caso stradale, il distanziamento tra i veicoli viene regolato mediante appositi dispositivi di segnalamento, che presentano un livello di automatizzazione più o meno elevato. Pertanto, un veicolo tram-treno dovrà essere dotato di sistemi che gli permettano di

³ UIC: Union internationale des chemins de fer. È un'associazione internazionale specializzata nel mondo dell'industria del trasporto ferroviario che redige le raccomandazioni tecniche in materia, da diversi anni recepite dal CEN.

interagire con il sistema di segnalamento ferroviario. Inoltre, i regolamenti ferroviari italiani, richiedono che i macchinisti siano sempre due; a tal proposito sarà necessario avere un secondo agente di bordo sul tram, oppure si dovranno rivedere i regolamenti ferroviari.

2.1.3 Prototipi di tram-treno esistenti nel mondo

Attualmente esistono nel mondo 29 esempi di veicolo tram-treno, la maggior parte dei quali si trova in Europa; fautrice di un tale sistema è la Germania, che presenta un elevato numero di prototipi, già ampiamente collaudati. Il tram-treno non ha trovato ostacoli nel svilupparsi in territorio tedesco in quanto è presente una normativa che disciplini le caratteristiche bimodali del veicolo: gli organi preposti per l'esercizio ferroviario e per quello tranviario, rispettivamente EBO⁴ e BOStrab⁵, hanno collaborato in maniera congiunta, trovando soluzioni atte a far circolare il mezzo sia su sedime ferroviario che tranviario. Al contrario, in Italia, il punto critico per la non utilizzazione di un sistema tram-treno è proprio la mancanza di una normativa specifica.

Di seguito vengono riportati i prototipi presenti nel mondo [16]:

⁴ German Railways Construction & Operation Regulation

⁵ German Tram Construction & Operation Regulation

Tabella 3: sistemi tram-treno presenti nel mondo

Continente	Città	Numero
Asia	Giappone/Toyama Giappone/Fukui	2
America	Canada, Calgary Canada/Edmonton Messico/Puebla USA/Salt Lake City USA/Seattle	5
Europa	Austria/Gmunden Belgio/Oostende Danimarca/Aarhus Francia/Esbly- Crécy Francia/Lione Francia/Mulhouse Francia/Nantes Francia/Parigi Francia/Villejuif-Athis-Mesi Germania/Chemnitz Germania/Karlsruhe Germania/Kassel Germania/Heidelberg Germania/Nordhausen Germania/Saarbrücken Germania/Zwickau Italia/Sassari Paesi Bassi/Rotterdam/Hauge Spagna/Alicante Spagna/Cadice Svizzera/Bex-Villars-Bretaye Regno Unito/Sheffield	22
	Totale	29

2.1.4 Il sistema Karlsruhe

Motivo principale per cui il tram-treno trova ampiamente successo in Germania è dovuto al fatto che essa presenti una fitta rete ferroviaria di tipo locale, talvolta scarsamente utilizzata; il primo prototipo di tram-treno nacque nel 1992 per collegare le città di Karlsruhe e Bretten, con una tratta di lunghezza pari a 23 km. Le peculiarità di tale sistema sono [13]:

- Utilizzo dei veicoli tram-treno di derivazione tranviaria;
- Esercizio promiscuo mediante la condivisione del binario ferroviario fra tali veicoli e il materiale rotabile ferroviario.

Pertanto si ha l'esercizio continuo dei veicoli tram – treno sulla rete ferroviaria insieme a materiale rotabile classico, in presenza sia di trasporto passeggeri che merci [14]; questo porta a definire questo sistema come tipo TT3.

In seguito all'introduzione di questo nuovo sistema di trasporto, la domanda è aumentata in maniera considerevole, agevolata anche da una politica intelligente in merito ad una tariffazione integrata del biglietto, il cui prezzo dipende dalla zona e dalla fascia oraria, e supportata da agevolazioni per famiglie e/o giorni festivi e weekend; l'integrazione tariffaria ha anche portato ad una diminuzione del costo del biglietto, dovuta ai minori costi di esercizio del sistema tranviario [14]. Si stima che tra il 1992 e il 1997 la domanda sia aumentata del 400%; allo stesso tempo si è potuta riscontrare la riduzione in termini percentuali dell'uso del mezzo privato in centro, sceso sotto il 50% [14].

Il modello scelto per effettuare il servizio era il mezzo bi-tensione Duewag GT 8-100 C/2S (azienda oggi acquisita dalla Siemens): si tratta di motrici a tre casse articolate su quattro carrelli di cui solamente quelli alle estremità sono motori; i veicoli sono inoltre bidirezionali e dotati di porte su ambo i lati; sono anche dotati di accoppiatori rapidi che permettono di variare la configurazione nelle ore di punta, facendola diventare multipla: questa soluzione trova ampio riscontro in Germania in quanto permette di risolvere i problemi legati all'instabilità dell'ora di punta senza aggiungere veicoli

in linea e quindi più personale [14]. I veicoli poi, tramite un inverter a bordo, passano dalla rete tranviaria in corrente continua al funzionamento in corrente alternata sui binari ferroviari [14].



Figura 10: veicolo bimodale presso la stazione centrale [14]

2.1.5 Italia: la metro Sassari

Ad oggi, esiste in Italia un'unica soluzione di tram-treno che si trova in Sardegna, ma non circola sulla rete gestita da RFI (Rete Ferroviaria Italiana), bensì su sedime ferroviario dell'ex Ferrovie della Sardegna, oggi ARST (Azienda Regionale Sarda Trasporti). È stata inaugurata nel 2009, e collega il centro cittadino con il quartiere periferico di Santa Maria di Pisa: quest'ultima è l'ultima e unica fermata su regime ferroviario, la restante parte della tratta è di tipo tranviario e si compone di 7 fermate. Il binario tranviario viaggia di lato a quello ferroviario, ma di fatto è totalmente indipendente da esso [17]. Lo scartamento adottato su entrambi i tratti è quello ridotto (950 mm), per cui non risultano particolari problemi di adattamento.

2.2. *Il treno a idrogeno*

Il settore dei trasporti è responsabile per circa un quarto (25%) delle emissioni dei gas serra [18] in Europa, pertanto la decarbonizzazione di tale settore rappresenta un punto chiave per realizzare la transizione energetica, ovvero il passaggio graduale dai combustibili fossili alle fonti rinnovabili; la ripartizione sui consumi nei trasporti è di seguito riportata:

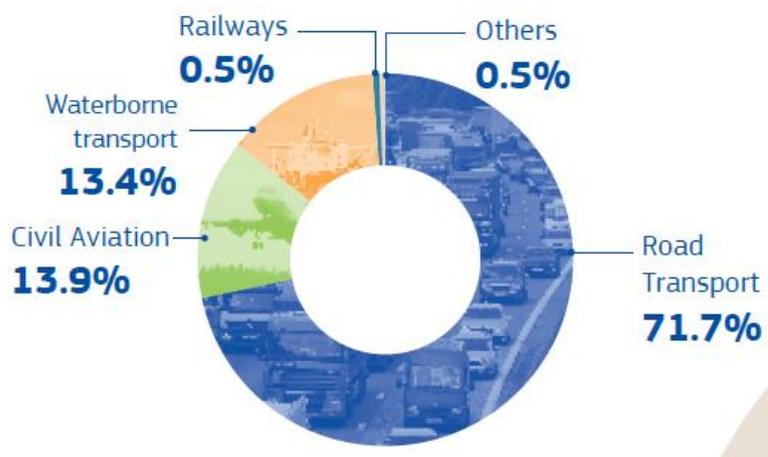


Figura 11: emissioni di gas causate dal settore dei trasporti [18]

Con il termine decarbonizzazione si intende propriamente il processo di riduzione del rapporto carbonio – idrogeno nelle fonti di energia [19], responsabile della quantità di emissioni di anidride carbonica (CO_2) in atmosfera. Alla Conferenza delle Parti del 2015 (COP21) della Convenzione sui cambiamenti climatici hanno partecipato 195 stati insieme a molte organizzazioni internazionali, e per la prima volta è stato siglato un accordo (Accordo di Parigi) per fronteggiare il rapido cambiamento climatico al quale si assiste ormai da anni: l'impegno è quello di mantenere l'innalzamento della temperatura sotto i $2^{\circ}C$ e, se possibile, sotto $1,5^{\circ}C$ rispetto ai livelli pre-industriali [20]. Nella stessa direzione è da intendersi il Green Deal europeo, un insieme di iniziative politiche proposte dalla Commissione europea con l'obiettivo finale per l'Europa di raggiungere la neutralità climatica entro il 2050 [21]. È chiaro che tra gli obiettivi di quest'ultimo vi sia la riduzione delle emissioni causate dai mezzi di trasporto, attraverso diverse politiche che mirano ad una mobilità

sostenibile; l'Europa infatti è responsabile di quasi un terzo delle emissioni mondiali di gas che riducono l'ozono.

Nel settore dei trasporti, l'idrogeno è la risorsa che sembra più promettente per contribuire ad una rapida decarbonizzazione, per il fatto che è un mezzo a zero emissioni; esso inoltre ha una rumorosità ridotta, è silenzioso come un treno elettrico ed elimina anche le emissioni locali di particolato [22].

Alstom si è da subito impegnata nel costruire nuovi treni atti ad assecondare la mobilità sostenibile: il suo treno a idrogeno, il Coradia iLint, è il primo ed unico treno al mondo alimentato da una cella a combustibile a idrogeno, ricevendo lo scorso gennaio il premio europeo in ambito ferroviario, l'European Railway Award [23].

Alstom lavora dal 2013 al progetto del treno a idrogeno, che bene si appresta alle piccole realtà locali caratterizzate da linee ferroviarie quasi sempre non elettrificate; dunque si presenta come un'ottima soluzione per sostituire i treni diesel. I primi due prototipi iLint sono entrati in servizio in Germania a partire da settembre 2018, e hanno percorso con successo 180 000 *km* fino a gennaio 2020; a partire dal 2022 entreranno in servizio regolare in Germania 41 treni a idrogeno.

In Italia la FNM (Ferrovie Nord Milano) ha commissionato ad Alstom 6 treni a celle a combustibile ad idrogeno, con possibilità di aggiungerne altri 8 successivamente; i primi verranno consegnati nel 2023 e andranno a viaggiare in Valcamonica e lungo la linea Brescia – Iseo – Edolo.

2.2.1 Tecnologia e caratteristiche

La versione proposta per l'Italia del treno a idrogeno prodotto da Alstom è il Coradia Stream, che sarà equipaggiato con la stessa tecnologia di propulsione a celle a combustibile introdotta nel Coradia iLint [24]; il treno è stato progettato e costruito seguendo i più elevati standard di sicurezza, e manterrà gli elevati standard di comfort e di silenziosità già apprezzati dai passeggeri nella versione elettrica [24], denominata in Italia "Pop". Questo treno ad alte prestazioni, mediante un utilizzo sempre più largo, si ripropone di raggiungere l'obiettivo dell'Europa arrivando al 2050 con zero emissioni di CO_2 .

Lo Stream si compone di 4 carrozze passeggeri e una centrale elettrica sempre passeggeri ma transitabile che contiene tutta la tecnologia per la produzione di energia a idrogeno, ovvero i serbatoi per immagazzinare l'energia in eccesso e le celle a combustibile. Il treno per il suo transito non necessita di nuove infrastrutture, pertanto potrà viaggiare fin da subito sulle linee non elettrificate senza interrompere il servizio; inoltre, in una visione a lungo termine, adeguando l'infrastruttura, mediante un sovradimensionamento della produzione di idrogeno da questi treni sarà possibile fornire anche altri utenti [24].

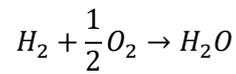
Tra i principali benefici e le peculiarità di questo sistema si distinguono:

- nessuna emissione di CO_2 o altri inquinanti: l'unico prodotto di scarico sarà vapore puro;
- nessun motore a combustione interna;
- batterie agli ioni di litio ad alte prestazioni: queste rappresentano un componente fondamentale del sistema, in quanto permettono di immagazzinare l'energia generata e non immediatamente spesa, fondamentale per il risparmio di carburante;
- carrozza elettrica in acciaio;
- pressione nominale nel serbatoio dell'idrogeno di 350 bar;
- tempi di rifornimento invariati rispetto al diesel;
- basato sulla tecnologia iLint, già ampiamente testato in Germania a partire dal 2018 e approvato dall'EBA⁶;
- tecnologia italiana avanzata lungo tutta la catena.

Il principio di funzionamento è demandato a quello della cella a combustibile, che è il cuore del sistema in quanto rappresenta la principale fonte di energia del treno. Questa genera la potenza necessaria per la trazione elettrica catalizzando l'idrogeno, che viene immagazzinato nei serbatoi, e l'ossigeno che proviene dall'aria esterna [24]. Dunque l'idrogeno, combinandosi con l'ossigeno per

⁶ Autorità bancaria europea (European Banking Authority): organismo dell'Unione europea il cui compito è quello di sorvegliare il mercato bancario europeo.

formare acqua, attraverso la cella a combustibile converte l'energia chimica in energia elettrica che alimenta il sistema di trazione; il funzionamento della cella a combustibile si basa sulla seguente reazione elettrochimica [25]:



Da cui si osserva che l'unico prodotto della reazione è acqua.

La batteria si ricarica in due modi: quando viene prodotta più energia di quella necessaria per la trazione oppure nella fase di frenatura, grazie al sistema di frenata rigenerativa. L'energia immagazzinata nella batteria è usata in accelerazione per offrire un supporto alle celle a combustibile a idrogeno, garantendo una prestazione più elevata.

Il treno è stato progettato per raggiungere la velocità di 140 km/h, la massima potenza di trazione in modalità idrogeno è 1170 kW, ha un'autonomia di 600 km e può ospitare fino a circa 500 passeggeri [24].



Figura 12: Coradia Stream a idrogeno [24]

2.3. *Il treno diesel Minuetto*

Il treno prodotto da Alstom soprannominato dall'Italia "Minuetto" appartiene alla famiglia dei Coradia Meridian; è stato progettato per soddisfare le esigenze di spostamento per le medie e le brevi distanze sulle linee a scarso traffico, che rappresentano i due terzi di rete ferroviaria nazionale che non interessa i grandi nodi metropolitani [26]. Il treno è stato prodotto sia in versione elettrica che in

quella diesel; in Italia, nel 2000, sono stati acquistati 200 convogli, che a partire dal 2003 hanno cominciato a circolare sulla rete ferroviaria italiana. In primo luogo questo prodotto Alstom si ripropone di soddisfare appieno le aspettative e il comfort del cliente, mirando anche alla funzionalità, dunque è stata posta particolare attenzione al design interno, completamente moderno, e alla cura degli ambienti; il tutto è stato realizzato con soluzioni di ampia visibilità, che garantiscono luminosità, comoda e rapida accessibilità grazie ai vestiboli molto ampi e ad un'ampia porzione con pavimento ribassato, sono presenti due comparti di tipo "salottino" con 3 + 3 posti frontali ad arco e i sedili sono disposti in file da 2 + 2 a correre; sono presenti inoltre diversi strapuntini [27]. Il convoglio può ospitare fino a circa 300 passeggeri.

Il treno è stato progettato per poter circolare in un range di temperatura $-25^{\circ}\text{C} \div +45^{\circ}\text{C}$; la sagoma limite di riferimento è quella prevista dalla fiche UIC 505-1. Inoltre, è garantita la circolazione su curve di raggio minimo 190 m (150 m a velocità pari a 30 km/h, 90 m in deposito a velocità ridotte) [27]. La massima velocità raggiungibile è 130 km/h.

Nella versione diesel (allo stesso modo in quella elettrica) il treno è bidirezionale in composizione bloccata ed è composto da tre elementi articolati su quattro carrelli: una testata motrice (ALn 501), una carrozza centrale (Ln 220) e una testata motrice finale (ALn 502).



Figura 13: treno Minuetto

3: ANALISI DELLA PRECEDENTE OFFERTA ED ESERCIZIO CON TRENO A IDROGENO E TRAM - TRENO

3.1 Meccanica della locomozione ferroviaria

Attraverso la meccanica della locomozione si studia la prestazione del singolo veicolo in relazione a come esso è fatto e al tipo di infrastruttura su cui si muove.

Il fenomeno fisico che permette il moto di tutti i veicoli terrestri è l'**aderenza**; essa è la reazione allo scorrimento di due superfici compresse, che sono l'infrastruttura e la ruota del veicolo:

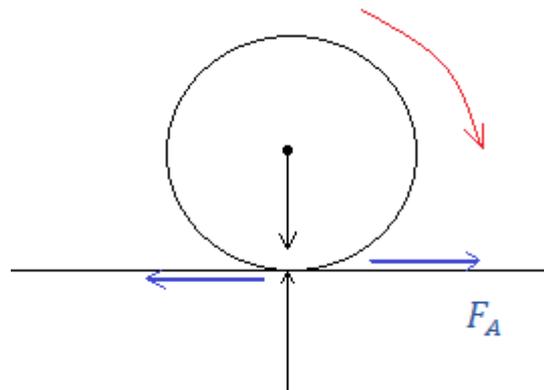


Figura 14: schema di interazione ruota – infrastruttura (ruota motrice)

L'aderenza viene definita anche come la “forza che si stabilisce tra due superfici a contatto sottoposte ad un'azione perpendicolare P che si oppone allo strisciamento di un corpo su un altro” [28]. L'azione dell'aderenza è associata alla deformazione delle superfici di contatto, pertanto l'ipotesi di contatto puntiforme è solo teorica [28]; nel caso stradale, a causa della maggiore deformabilità degli pneumatici, i coefficienti di aderenza sono più alti rispetto al caso ferroviario, dove il contatto ruota – rotaia, entrambe d'acciaio, fa sì che vi sia un'area di impronta minore. Affinché il fenomeno dell'aderenza possa esplicarsi, necessita che vi sia uno scorrimento relativo tra ruota e rotaia, che tuttavia non è un vero e proprio moto relativo tra i due corpi, ma è di dimensioni trascurabili rispetto a quelle dei corpi stessi [28]; per tale motivo viene definito *pseudoscorrimento* ed è dato da [29] [28]:

$$\delta = \frac{\omega \cdot r - v}{\omega \cdot r}$$

Dove:

- ω : velocità angolare della ruota;
- r : raggio della ruota;
- v : velocità di avanzamento del veicolo.

La condizione tale per cui si abbia scorrimento tra le due superfici è: $0 \leq \delta \leq 1$, che si traduce per la ruota motrice in: $v < \omega \cdot r$. Per la ruota in frenatura si avrà che il momento applicato alla ruota è di segno opposto, pertanto la condizione di scorrimento è data da: $v > \omega \cdot r$ [30].

La forza di aderenza viene espressa come:

$$F_a = f_a \cdot Q_a$$

In cui:

- f_a : coefficiente di aderenza;
- Q_a : peso aderente, ovvero è il peso che scarica sugli assi motori.

In ambito ferroviario non si diversificano le superfici a contatto, pertanto il coefficiente di aderenza dipende dal tipo di trazione, dalle condizioni in cui si trova l'infrastruttura, dalla presenza di acqua, gelo o polvere [28], ma anche da diversi altri fattori: esso varia con il variare dello scorrimento (o pseudoscorrimento) e anche al variare della velocità. L'aria di contatto che si ha tra ruota e rotaia prende il nome di "ellisse di Hertz" [29] e, come già anticipato, a causa del contatto acciaio – acciaio, risulta molto più piccola di quella che si ha nel caso stradale, pertanto si avrà una forza di aderenza minore. Infatti, se si osserva l'andamento del coefficiente di aderenza in funzione dello scorrimento, una volta raggiunto il valore massimo si avrà un salto repentino del valore del coefficiente, dovuto al fatto che una volta persa l'aderenza, questa è molto difficile da recuperare:

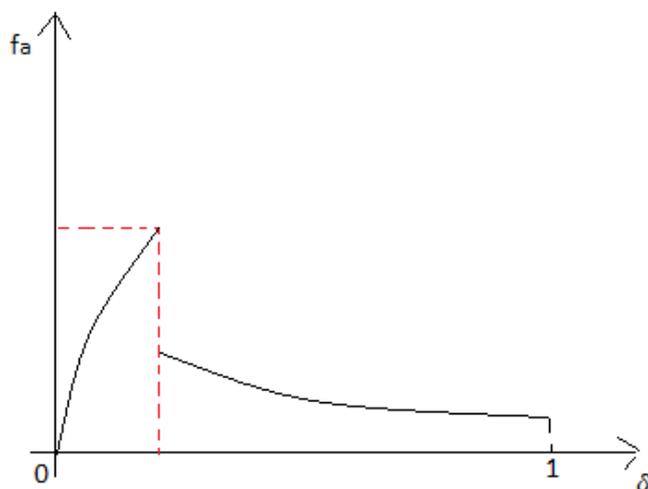


Figura 15: andamento del coefficiente di aderenza in funzione dello scorrimento

Il punto di massimo della forza di aderenza è quello che garantisce le maggiori prestazioni del veicolo.

L'espressione della forza di aderenza presenta un'evidente analogia con quella delle forze di attrito, ma queste due non sono da confondere: l'aderenza non è una forza dissipativa e si verifica anche in assenza di macro scorrimenti delle superfici [28]; essa varia con lo pseudoscorrimento in maniera quasi proporzionale (come avviene per i fenomeni elastici), ma superato un certo valore f_a rimane quasi costante, pertanto si esce dal regime di aderenza e si entra in regime di attrito [28].

È stato osservato sperimentalmente che al variare della velocità V [km/h] il valore di f_a decresce secondo la curva di Metzkwow - Muller di seguito riportata (si distingue tra rotaie asciutte e rotaie umide) [28]:

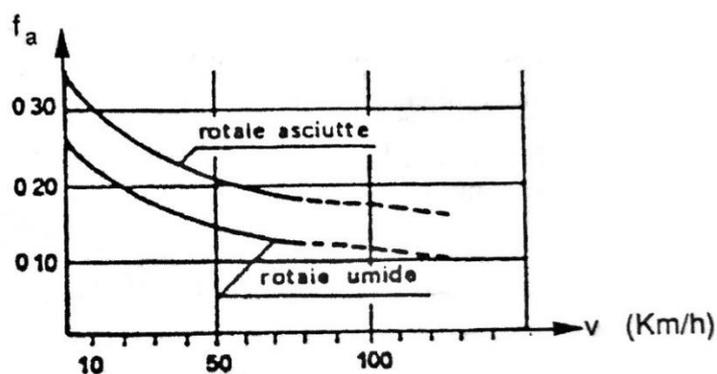


Figura 16: curve di Metzkwow - Muller del coefficiente di aderenza

È possibile calcolare il valore del coefficiente di aderenza attraverso la relazione:

$$f_a = \frac{f_{a0}}{1 + \frac{V}{100}}$$

In cui compare:

- f_{a0} : massima aderenza, che si ha per $V = 0$;
- V : velocità espressa in km/h .

Un altro fattore da cui risulta influenzata la forza di trazione è la condizione di **potenza**:

$$P [\text{watt}] = \frac{F \cdot v}{\eta} \Rightarrow F = \frac{P \cdot \eta}{v}$$

Dove η è il coefficiente di rendimento che tiene conto dei fenomeni dissipativi, v è espresso in m/s ed F in N . Essa rappresenta la potenza necessaria alle ruote per ottenere lo sforzo F alla velocità v [28].

Riportando l'andamento della forza di trazione in funzione della velocità di avanzamento del veicolo si ottiene la Caratteristica Meccanica di Trazione (CMT), che nel caso ideale assume la forma di un'iperbole:

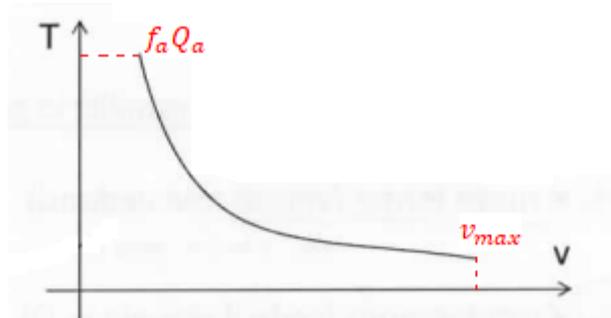


Figura 17: caratteristica meccanica di trazione

In particolare, se la potenza è costante ($F \cdot v = cost$), si avrà un'iperbole equilatera: questo è il caso in cui il motore riesce a sfruttare la potenza massima ad ogni velocità e in qualsiasi condizione di tracciato [28].

In realtà, ciò che limita il motore alle basse velocità è la condizione di aderenza, che rappresenta quindi il limite superiore della forza di trazione, mentre alle alte velocità la condizione di potenza.

3.2 Resistenze al moto

Le resistenze al moto sono forze che si oppongono al moto di un veicolo, e si dividono in:

- Ordinarie: sono sempre presenti, si sviluppano ogni qualvolta il veicolo si muove;
- Accidentali: si verificano solo in determinate condizioni, sono dovute alla traiettoria del moto.

Resistenze al moto ordinarie

Le resistenze ordinarie rappresentano delle azioni che contrastano l'avanzamento del veicolo in moto rettilineo uniforme ed in piano; quelle da considerare sono la resistenza al rotolamento e la resistenza aerodinamica.

Il fenomeno della resistenza al rotolamento, in ambito ferroviario, è poco accentuato a causa della poca deformabilità che hanno ruota e rotaia, entrambe in acciaio. Tuttavia non si può trascurare l'attrito ai perni, che si manifesta principalmente all'avvio del moto.

La resistenza aerodinamica è dovuta alle azioni frontali e laterali che il veicolo incontra quando è immerso in un fluido (aria).

In ambito ferroviario si è soliti indicare queste due resistenze in maniera univoca con il termine r_0 , che indica la resistenza specifica del materiale rotabile e viene fornita insieme alla caratteristica meccanica di trazione. Bassi valori di tale resistenza (1,5 – 2 ‰) sono esempi di materiale rotabile nuovo e moderno, invece valori più alti (fino a 8 – 9 ‰) connotano un materiale rotabile molto vecchio. Questi valori sono circa 1/6 – 1/10 di quelli che si ritrovano in ambito stradale: questo è dovuto al contatto rigido che si ha tra ruota e rotaia e riduce in maniera considerevole i consumi energetici. Per questo motivo il sistema ferroviario è energeticamente molto competitivo, purché viaggi con adeguato carico.

Per il calcolo delle resistenze ordinarie si ricorre spesso all'utilizzo di formule binomie e trinomie, di seguito riportate [31]:

$$r_0 = a + bV^2 \text{ [N/kN] o [daN/t]}$$

Vehicle type	a	b
Locomotive plus train		
- Low speed (Clark)	2.4	0.001
- Medium speed (Erfurt)	2.4	1/1300
- High speed (Von Borries)	1.6	0.3(1+50/V)/1000
Fast electric locomotives (Swiss)	2.5	0.0003
Electric freight locomotives (Swiss)	3	0.0005
Diesel-electric locomotives (Strahl)	3.5	0.006S / P(1+12 / V) ²
Fast freight cars (Strahl)	2.5	0.0004
Mixed freight cars (Strahl)	2.5	0.0005
Empty freight cars (Strahl)	2.5	0.001
Two-axle passenger cars (Frank)	2.5	0.0004
Two-bogie passenger cars (Frank)	2.5	0.00014
Electric multiple units (Breuer)	1.5	SK0.005/P
Light material trains (Italy)	1.9	0.00027
Common material trains (Italy)	2	0.00028
Freight trains and isolated locomotives	2.5	0.0003

Figura 18: coefficienti per il calcolo della resistenza ordinaria specifica utilizzando la formula binomia

$$r_0 = a + bV + cV^2 \text{ [N/kN] o [daN/t]}$$

Type of vehicle	A	b	c
Electric locomotives	24/√P	0.01	0.0035 A/P
Two-axle trailer vehicles (Sanzin)	1.6	0.0184	0.00046
Four-axle trailer vehicles (Sanzin)	1.6	0.00456	0.000456

Figura 19: coefficienti per il calcolo della resistenza ordinaria specifica utilizzando la formula trinomia

Resistenze accidentali

Le resistenze dovute all'andamento del tracciato sono resistenze accidentali, e dipendono dalla presenza di curve e di pendenze eccessive. Si hanno pertanto:

- Resistenza dovuta alla pendenza, che dipende dalla componente del peso del veicolo in direzione parallela a quella del moto che nasce a causa della pendenza;
- Resistenza dovuta alle curve, che nasce dall'attrito e dagli urti che si verificano tra il bordino della ruota e la rotaia.

La resistenza specifica dovuta alla pendenza si ottiene facilmente dal valore della livelletta (con buona approssimazione), espressa in ‰.

La resistenza dovuta alle curve dipende dal raggio proprio delle curve, valori più piccoli dei raggi delle curve comportano valori di resistenza maggiori. Per calcolarla si utilizzano generalmente le formule di Von Rockl:

$$r_c = \frac{a}{R - b}$$

Tabella 4: coefficienti della formula di Von Rockl

Raggio della curva [m]	a	b
≥ 350	650	55
350 – 250	650	65
250 – 150	650	30

Le Ferrovie dello Stato offrono dei propri coefficienti per il calcolo della resistenza specifica in curva, che è possibile confrontare con quelli ottenuti dalla formula sopra scritta:

Raggio di curva R =	1000	900	800	700	600	500	450	400	350	300	250	200	180
r_c in kg/tonn =	0,5	0,6	0,8	1,0	1,2	1,5	1,7	2,0	2,4	2,8	3,4	4,2	4,5

Figura 20: valori di resistenza specifica in curva proposti da FS

3.3 Equazione del moto

La legge del moto che si utilizza per studiare le prestazioni del veicolo è il II principio della dinamica, che si scrive separando le forze di trazione dalle resistenze al moto:

$$F - R = m_e \cdot \frac{dv}{dt}$$

Dove:

- $m_e = m \cdot (1 + \beta)$: è la massa equivalente, utilizzata per tenere conto del contributo che le masse rotanti danno all'inerzia.

L'equazione del moto può essere risolta in forma chiusa solo quando il moto del veicolo è uniformemente accelerato, dunque presenta un valore di accelerazione costante. In caso contrario è necessario procedere con l'integrazione della formula.

Una approssimazione che spesso viene fatta, per risolvere l'equazione in maniera semplificata, è dividere l'intervallo di velocità in diversi sotto intervalli, all'interno dei quali è possibile considerare il moto come uniformemente accelerato; in questo modo si risolve l'equazione in forma chiusa per ogni intervallo, ricavando infine lo spazio e il tempo di percorrenza come somma dei valori ottenuti.

Un tale metodo prende il nome di *integrazione tabellare*, ed è quello più generalmente utilizzato.

A seconda della diversa fase in cui il convoglio si trova, l'equazione del moto assume valori differenti:

1. Fase di avviamento o accelerazione:

$$F - R = m_e \cdot \frac{dv}{dt}$$

2. Fase a regime: è la fase in cui l'accelerazione è costante, pertanto le forze di trazione eguagliano le resistenze:

$$F = R$$

3. Fase di marcia inerziale (coasting): si ritrova questa fase solo nel moto dei veicoli ferroviari; in questo caso non viene applicata nessuna forza di trazione, ma il veicolo avanza solo grazie all'inerzia raggiunta:

$$-R = m_e \cdot \frac{dv}{dt}$$

4. Fase di frenatura: in questa fase le forze di trazione diventano concordi alle resistenze:

$$-F - R = m_e \cdot \frac{dv}{dt}$$

Queste 4 fasi individuano il diagramma del moto del convoglio.

3.4 Parametri di un sistema di trasporto

Vengono di seguito elencati i parametri che servono a caratterizzare un sistema di trasporto:

- *Potenzialità della linea*: essa è definita come il numero massimo di passeggeri che è possibile trasportare in un'ora per direzione di marcia:

$$P = \frac{C}{i} 3600$$

La potenzialità quindi aumenta all'aumentare della capienza del veicolo e al diminuire dell'intervallo tra i passaggi; può essere espressa anche come:

$$P = \frac{CN}{T_c} 3600$$

Dove:

- C : capienza del veicolo;
- N : numero dei veicoli in linea;
- T_c : tempo ciclo: tempo occorrente al mezzo per effettuare un ciclo di andata e ritorno tra i capolinea; è comprensivo di:

- Tempo di circolazione;
- Tempo di fermata, salita e discesa;
- Tempo di arresto al capolinea.

La stessa potenzialità di trasporto può essere ottenuta con veicoli di ridotte dimensioni ad elevata frequenza di passaggio, oppure con convogli ad elevata capienza e a più bassa frequenza.

Tutto questo influenza il secondo parametro da considerare:

- *Velocità commerciale*, da cui dipende anche il consumo di energia: aumentare la velocità commerciale è l'obiettivo comune, in quanto è il parametro direttamente associato al buon funzionamento di un sistema di trasporto. Essa è definita come la velocità di trasferimento degli utenti dall'inizio alla fine del proprio percorso [32]; è un parametro direttamente associato alla percezione dell'utente, fa infatti riferimento al tempo di spostamento nel sistema, comprensivo del tempo di sosta alle fermate; i fattori che la influenzano sono:
 - I perditempo per l'incarozzamento dei passeggeri alle fermate;
 - Prestazioni in accelerazione e frenatura;
 - Velocità massima del sistema;
 - Distanza media tra le fermate.

I fattori che invece la influenzano esternamente sono:

- Traffico veicolare;
- Semafori.

Gli altri parametri che influenzano le prestazioni di un sistema di trasporto, in misura più o meno rilevante, sono di seguito elencati [32]:

- *Frequenza del servizio*: distanziamento ottenibile tra i veicoli, f ;
- *Regolarità del servizio*: percentuale delle corse giunte al capolinea con una differenza determinata massima col tempo previsto;

- *Sicurezza*: viene misurata come numero di morti, feriti e danni per 100 milioni di passeggeri/km (o unità simile);
- *Capacità della linea*: massima possibilità di trasporto, in un'ora, per ciascuna direzione di marcia, con utilizzo ovviamente omotachico di materiale con prestazioni analoghe o uguali;
- *Capacità di produzione del servizio*, ottenuta come prodotto della velocità commerciale e della capacità della linea;
- *Produttività*: quantità unitaria di risorse utilizzate;
- *Utilizzazione del servizio*, ad esempio i posti offerti rispetto a quelli effettivamente utilizzati.
-

3.5 Caratteristiche della linea Saluzzo – Savigliano

Per schematizzare in maniera più semplice e intuitiva la rete ferroviaria italiana, si è pensato di suddividerla in tratte che avessero caratteristiche omogenee dal punto di vista della resistenza che dipende dalle caratteristiche piano – altimetriche del tracciato. Sono pertanto stati individuati 31 gradi di prestazione, a ciascuno dei quali compete un determinato valore di resistenza di trazione costante, che cresce in maniera progressiva; essa è detta anche *pendenza fittizia* ed è data dalla somma delle due resistenze specifiche dovute alle pendenze (in ‰) e alle curve (può essere espressa in: $kg/t, N/kN, ‰$):

$$I = i + r_c$$

Dal fascicolo di linea si può leggere il grado di prestazione che la tratta in questione presenta, che nelle due direzioni assume un valore differente, pari a:

Tabella 5: gradi di prestazione

	Grado di prestazione	$i + r_c [N/kN]$
Saluzzo - Savigliano	1	4,5
Savigliano - Saluzzo	18	18,4

Le livellette che si ritrovano lungo la linea sono le seguenti:

Savigliano - Saluzzo

- Progressiva 38,384: 4‰
- Progressiva 32,597: 17‰

Saluzzo - Savigliano

- Progressiva 32,597: 1‰

Su tutto il tracciato sono presenti inoltre due curve, i cui raggi sono: $R_1 = 337,6 \text{ m}$ ed $R_2 = 209 \text{ m}$.

La curva di raggio minore è quella che condiziona la marcia del convoglio pertanto, a partire dal raggio di essa, è possibile determinare la velocità di tracciato, definita come la velocità limite della curva di raggio minore. La velocità limite è data dalla seguente espressione [32]:

$$V_L = 4,62\sqrt{R}$$

L'espressione della velocità limite è stata ottenuta considerando il valore massimo di sopraelevazione, pari a 160 mm e un valore di accelerazione non compensata limite pari a $0,6 \text{ m/s}^2$.

Nel caso in esame, entrambe le curve si trovano una in prossimità della stazione di Saluzzo (curva di raggio R_2), l'altra in prossimità della stazione di Savigliano (curva di raggio R_1); dal momento che in entrambe le direzioni rientrano pienamente nello spazio di accelerazione del convoglio (in tutti e 3 i casi di seguito elencati), la velocità limite associata alla curva di raggio più piccolo non condiziona

la velocità di tracciato, che pertanto può in generale essere mantenuta uguale alla massima velocità ammessa dalla linea (80 km/h).

3.6 *Esercizio svolto prima della chiusura: Minuetto*

Ripercorrendo l'esercizio che è stato svolto fino al 2012, sono stati calcolati i consumi in termini di kWh e kWh/seat · km. Il servizio era svolto mediante il treno a trazione diesel progettato da Alstom appositamente per i servizi di trasporto regionale e appartenente alla famiglia dei Coradia Meridian, soprannominato da Trenitalia "Minuetto" (capitolo 2). Il convoglio è stato progettato per raggiungere una velocità massima di 130 km/h e offre 144 posti a sedere, ma considerando un'occupazione di 4 passeggeri per m² si arriva ad un totale di 309 posti; in quest'ultima condizione sono stati eseguiti i calcoli, considerando il peso a carico massimo che ne deriva, pari a 127,75 t. La caratteristica di resistenza al moto, necessaria per il calcolo delle prestazioni, tanto in trazione quanto in frenatura, è stata valutata considerando la seguente formula⁷:

$$R = (A + BV) \cdot M + C \cdot V^2 \quad [kN]$$

In cui:

- $A = 0,01716 \cdot \sqrt{10 \cdot \frac{N_e}{M}} = 0,015348 \text{ kN/t}$
- $B = 0,00019 \text{ kN/t} \cdot \left(\frac{km}{h}\right)^{-1}$
- $C = 0,01 \cdot (0,001042 \cdot S + 23,5 \cdot e^{-6} \cdot P \cdot L) = 0,00027034 \frac{kN}{t} / (kmh^{-1})^2$
- V : velocità [km/h]
- $S = 11,115 \text{ m}^2$: sezione frontale
- $P = 12,67 \text{ m}$: perimetro anteriore

⁷ Le caratteristiche del treno sono state fornite da Alstom (www.alstom.com) e sono dati riservati.

- $L = 51,9 \text{ m}$: lunghezza del treno a composizione fissa
- $N_e = 8$: numero di assili
- M : massa del rotabile in t .

Di seguito vengono riportate le curve di prestazione, curve che riportano l'andamento delle resistenze associato a quello della caratteristica meccanica di trazione; in particolare si riporta l'andamento della forza di trazione, della resistenza propria di questo materiale rotabile (R_0) e della resistenza relativa ad una livelletta generica del 20‰, che evidentemente farà spostare verso l'alto la curva della resistenza ordinaria:

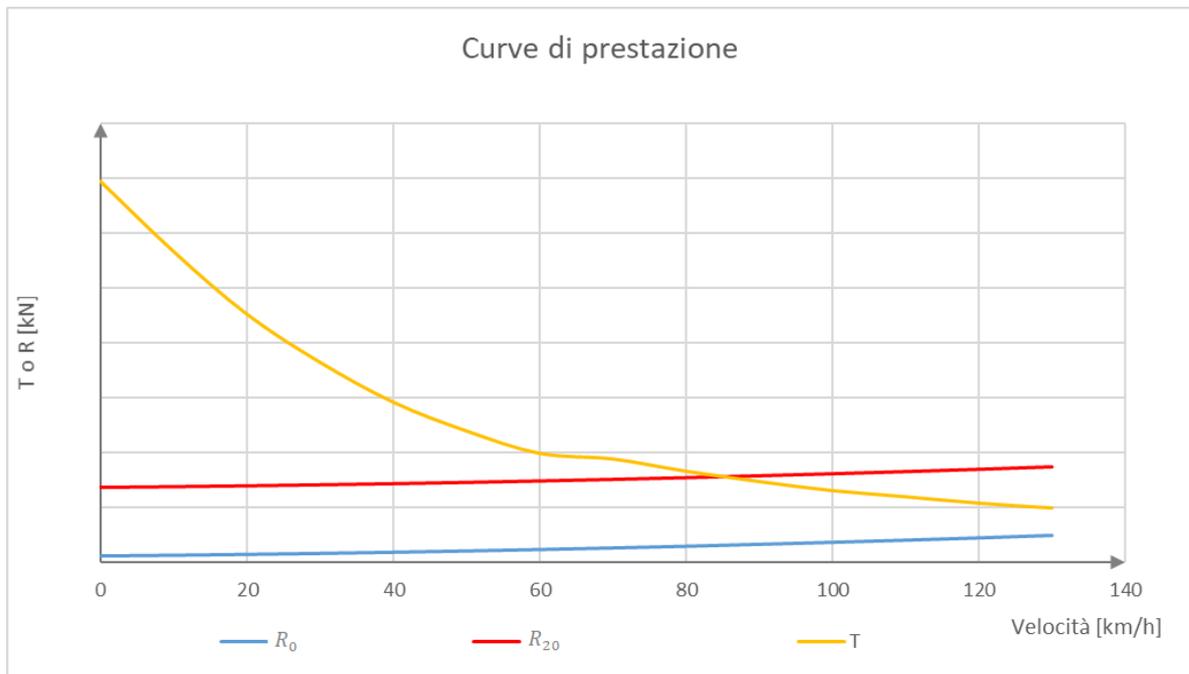


Figura 21: curve di prestazione del Minuetto

A partire dalla caratteristica di trazione, nonché dai valori di resistenza, considerando anche le resistenze dovute alle due curve presenti nel tracciato, tramite l'integrazione tabellare è stato possibile ricavare i parametri di interesse, relativi agli spazi e tempi di accelerazione, all'accelerazione media raggiunta, e quindi i consumi in termini di kWh e in termini di $kWh/seat \cdot km$; per ottenere un calcolo più preciso sono stati considerati intervalli di velocità pari a 5 km/h . In

relazione alla direzione considerata, sono state considerate le relative resistenze accidentali (dal fascicolo di linea si è ottenuta tale informazione). Inoltre, ai fini del calcolo dei consumi, volendo considerare la situazione peggiorativa, sono state considerate solamente la fase di accelerazione e di regime, escludendo a priori la fase di coasting, che porterebbe invece ad un risparmio, ed escludendo la fase di frenatura, che non incide molto sui consumi finali. Di seguito si riportano i calcoli relativi ad entrambe le direzioni di marcia.

Savigliano - Saluzzo

Considerando tale direzione di marcia, partendo dalla stazione di Savigliano si riscontra la presenza della livelletta del 4‰, nonché della curva di raggio R_{c1} (curva di raggio minore, che non influenza la velocità di tracciato; considerando la condizione di rango A, la sua velocità limite è pari a $V_L = 85 \text{ km/h}$).

Di seguito si riportano le curve di prestazione con le resistenze associate a questa direzione di marcia:

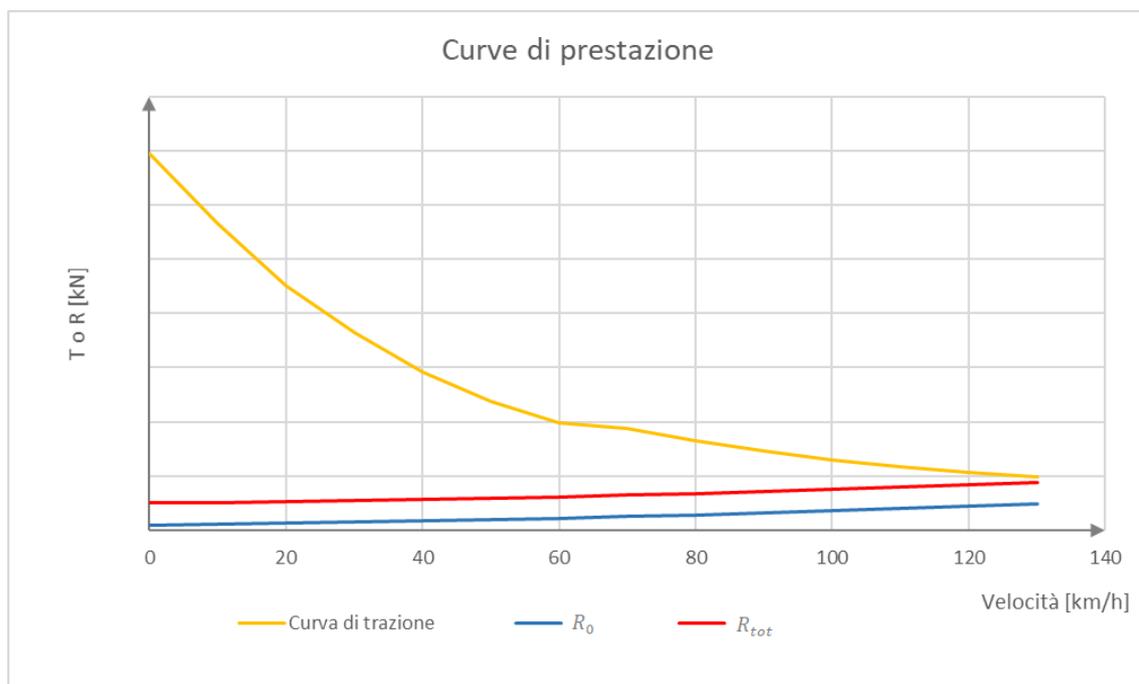


Figura 22: curve di prestazione del Minuetto nella direzione Saluzzo - Savigliano

La curva della resistenza R_{tot} è stata calcolata considerando:

$$R_{tot} = R_0 + R_i(4‰) + R_{c1}$$

Dal grafico si può osservare come, teoricamente, il treno potrebbe viaggiare fino alla velocità di 130 km/h, ma dalle limitazioni imposte dalla linea, che prevede una velocità massima in rango A pari a 80 km/h, è stato considerato quest'ultimo valore come velocità di tracciato.

Applicando l'equazione del moto relativa alla fase di accelerazione ($T - R = m_e \cdot dv/dt$) sono state ottenute le grandezze d'interesse. Per il calcolo della massa equivalente è stato considerato il coefficiente $\beta = 0,05$.

Di seguito vengono riportati (in parte) i calcoli dell'integrazione tabellare:

Tabella 6: integrazione tabellare con Minuetto in direzione Savigliano - Saluzzo

V [km/h]	$T - R$ [kN]	a [m/s^2]	Δt [s]	Δs [m]	T [s]	S [m]
0	129,04	0,96	0,00	0,00	0,00	0,00
5	116,07	0,87	1,52	1,06	1,52	1,06
10	103,10	0,77	1,70	3,54	3,22	4,60
15	91,48	0,68	1,91	6,65	5,14	11,25
20	79,86	0,60	2,17	10,57	7,31	21,82
25	70,86	0,53	2,47	15,45	9,78	37,27
30	61,86	0,46	2,81	21,45	12,59	58,71
35	54,35	0,41	3,21	28,94	15,80	87,66
40	46,84	0,35	3,68	38,35	19,48	126,01
45	41,33	0,31	4,23	49,89	23,70	175,90
50	35,81	0,27	4,83	63,74	28,53	239,64
55	31,44	0,23	5,54	80,81	34,08	320,45
60	27,07	0,20	6,37	101,71	40,44	422,16
65	25,74	0,19	7,06	122,49	47,50	544,64
70	24,40	0,18	7,43	139,33	54,93	683,98
75	21,85	0,16	8,06	162,25	62,99	846,23
80	19,29	0,14	9,06	195,01	72,04	1041,24

Sono stati poi calcolati i dati relativi alla potenza, e quindi ai consumi.

Tabella 7: consumi relativi al Minuetto nella tratta Savigliano - Saluzzo

V [km/h]	Potenza media [kW]	Energia [kWh]	Energia TOT [kWh]	Energia [kWh/seat · km]
0	0	0	0,0000	0,0000
5	87,6147	0,0370	0,0370	0,1153
10	245,0146	0,1157	0,1527	0,1075
15	369,6334	0,1966	0,3493	0,0973
20	463,3895	0,2799	0,6292	0,0871
25	534,5068	0,3670	0,9963	0,0781
30	586,6588	0,4575	1,4538	0,0702
35	621,7206	0,5537	2,0075	0,0629
40	641,8023	0,6564	2,6639	0,0563
45	654,2244	0,7680	3,4319	0,0506
50	661,7861	0,8880	4,3199	0,0458
55	663,7111	1,0216	5,3415	0,0416
60	661,6393	1,1703	6,5118	0,0379
65	675,7886	1,3244	7,8362	0,0356
70	710,4045	1,4664	9,3027	0,0346
75	729,6946	1,6330	10,9357	0,0331
80	731,9999	1,8419	12,7776	0,0311
			TOT	0,9849

La fase di regime è stata considerata protratta fino all'inizio della fase di frenatura, il cui spazio è stato considerato come spazio di arresto limite per passare dalla velocità di 80 km/h alla velocità di 0 km/h, fornito dalla formula UIC 544-1:

$$s_a[m] = \frac{V_0^2}{\frac{1,09375 \cdot \lambda_c}{\varphi(V_0)} + \frac{0,127}{\varphi(V_0)} \pm 0,235 \cdot i\%_0}$$

In cui:

- $i = 17\text{‰}$, livelletta che si trova in prossimità della stazione di Saluzzo, presa con segno positivo;
- $\lambda_c = 145\%$, percentuale di peso frenato, fornita insieme alle caratteristiche del convoglio;
- $\varphi(V_0) = 0,0676$, coefficiente tabellato in funzione della velocità.

In questo modo è possibile ottenere la durata della fase di regime, lo spazio percorso in questa fase e i relativi consumi:

Tabella 8: valori di riferimento per la fase di regime in direzione Savigliano - Saluzzo

V [km/h]	S [m]	T [s]	Potenza [kW]	Energia [kWh]	Energia [kWh/seat · km]
80	13620,59	612,92	731,60	124,56	0,03

Si riportano quindi le caratteristiche salienti ottenute:

Tabella 9: caratteristiche principali ottenute

a_{media} [m/s^2]	0,43
Spazio di accelerazione [m]	1041,24
Tempo di accelerazione [s]	72
Energia Totale spesa (accelerazione + regime) [kWh]	137,34
Energia Totale (acc. + regime) [kWh/seat · km]	1,01

Saluzzo – Savigliano

Viene adesso analizzata l'altra direzione di marcia, dunque le caratteristiche del tracciato sono differenti: questa volta si considerano in uscita dalla stazione di Saluzzo una livelletta pari a 1‰ e la curva di raggio $R_{c2} = 209\text{ m}$. Si riportano le curve di prestazione con le resistenze del caso:

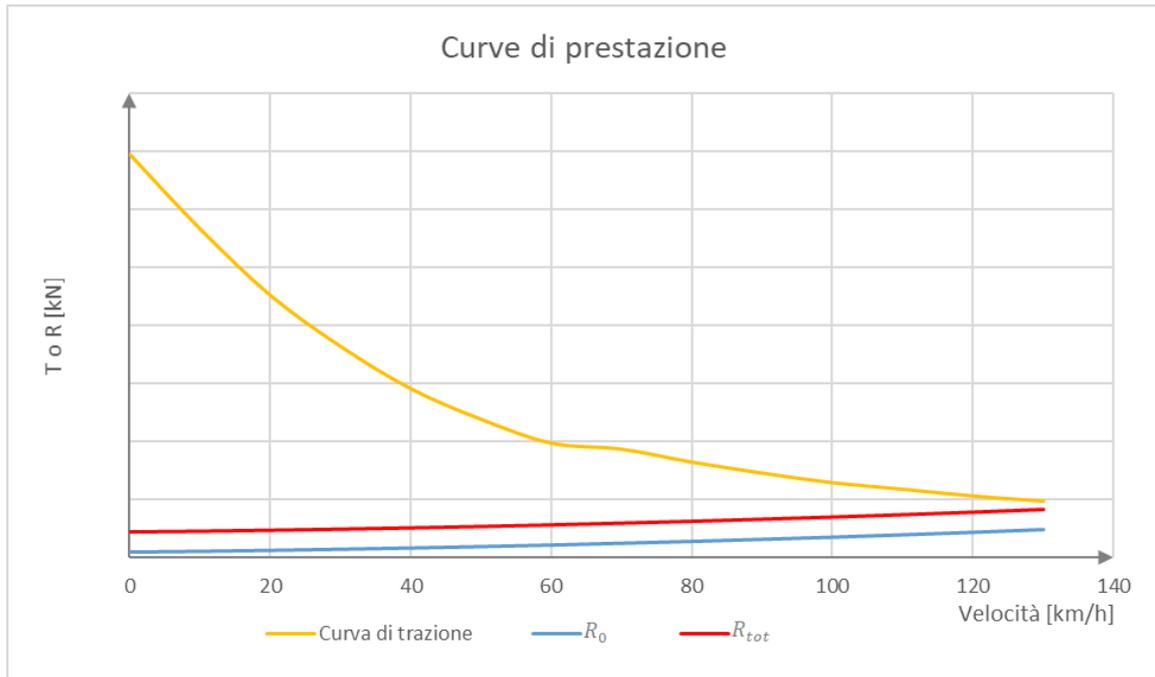


Figura 23: curve di prestazione del Minuetto nella direzione Saluzzo – Savigliano

La curva di resistenza totale è stata calcolata considerando:

$$R_{tot} = R_0 + R_i(1\%) + R_{c2}$$

Anche in questo caso la curva delle resistenze non intercetta la curva di trazione, per cui non ci sarebbero limiti imposti sulla velocità; di nuovo per le considerazioni sopra fatte, si considera come velocità di regime $V = 80 \text{ km/h}$.

Considerando la fase di accelerazione e applicando l'equazione del moto, tramite l'integrazione tabellare si perviene ai seguenti risultati:

Tabella 10: integrazione tabellare con Minuetto in direzione Saluzzo - Savigliano

V [km/h]	$T - R$ [kN]	a [m/s^2]	Δt [s]	Δs [m]	T [s]	S [m]
0	130,13	0,97	0	0	0	0
5	117,16	0,87	1,51	1,05	1,51	1,05
10	104,19	0,78	1,68	3,51	3,19	4,55
15	92,57	0,69	1,89	6,58	5,08	11,13
20	80,95	0,60	2,15	10,44	7,23	21,57
25	71,95	0,54	2,44	15,23	9,67	36,80
30	62,95	0,47	2,76	21,10	12,43	57,90
35	55,44	0,41	3,15	28,41	15,58	86,31
40	47,94	0,36	3,60	37,54	19,18	123,85
45	42,42	0,32	4,12	48,69	23,31	172,54
50	36,90	0,28	4,70	61,99	28,00	234,52
55	32,53	0,24	5,37	78,27	33,37	312,79
60	28,17	0,21	6,14	98,05	39,51	410,84
65	26,83	0,20	6,78	117,63	46,28	528,47
70	25,49	0,19	7,12	133,52	53,41	661,99
75	22,94	0,17	7,69	154,94	61,10	816,93
80	20,38	0,15	8,60	185,18	69,70	1002,12

I dati relativi alla potenza, uguale in entrambe le direzioni, e quindi ai consumi, sono in questo caso:

Tabella 11: consumi relativi al Minuetto nella tratta Saluzzo - Savigliano

V [km/h]	Potenza media [kW]	Energia [kWh]	Energia TOT [kwh]	Energia [kwh/seat · km]
0	0	0	0	0
5	87,6147	0,0367	0,0367	0,1153
10	245,0146	0,1146	0,1512	0,1075
15	369,6334	0,1944	0,3457	0,0973
20	463,3895	0,2764	0,6221	0,0871
25	534,5068	0,3618	0,9839	0,0781
30	586,6588	0,4501	1,4340	0,0702
35	621,7206	0,5435	1,9775	0,0629
40	641,8023	0,6426	2,6201	0,0563
45	654,2244	0,7494	3,3695	0,0506

50	661,7861	0,8636	4,2331	0,0458
55	663,7111	0,9894	5,2225	0,0416
60	661,6393	1,1283	6,3508	0,0379
65	675,7886	1,2719	7,6227	0,0356
70	710,4045	1,4053	9,0279	0,0346
75	729,6946	1,5595	10,5874	0,0331
80	731,9999	1,7491	12,3365	0,0311
			TOT	0,9849

La fase di regime è stata considerata in maniera analoga al caso precedente, considerando la formula UIC 544-1 per lo spazio di arresto, ma in questa direzione non risulta nessuna livelletta verso Savigliano, pertanto la formula ha dato luogo ad uno spazio di arresto maggiore; i valori ottenuti sono:

Tabella 12: valori di riferimento per la fase di regime in direzione Saluzzo - Savigliano

<i>V [km/h]</i>	<i>S [m]</i>	<i>T [s]</i>	<i>Potenza [kW]</i>	<i>Energia [kWh]</i>	<i>Energia [kWh/seat · km]</i>
80	13625,31	613,14	731,60	124,60	0,03

Si riportano quindi le caratteristiche salienti ottenute:

Tabella 13: caratteristiche principali ottenute

<i>a_{media} [m/s²]</i>	0,44
<i>Spazio di accelerazione [m]</i>	1002,12
<i>Tempo di accelerazione [s]</i>	69,70
<i>Energia Totale spesa (accelerazione + regime) [kWh]</i>	136,94
<i>Energia Totale (acc. + regime) [kWh/seat · km]</i>	1,01

Confrontando i valori ottenuti in entrambe le direzioni, in prima battuta si può osservare come i valori in termini di consumi risultino prossimi, in questo caso uguali, tra loro; ciò è dovuto al fatto che la tratta in questione non risulta tortuosa, ma al contrario oppone delle resistenze molto basse. Nella direzione Saluzzo – Savigliano, le resistenze sono minori rispetto alla direzione opposta: la maggiore resistenza opposta dalla curva di raggio R_{c2} ($5,66 \text{ kN}$) viene compensata dalla minore resistenza dovuta alla livelletta di pendenza 1% , rispetto a quella nell'altra direzione che è invece del 4% . Questo dà luogo ad un valore di accelerazione media leggermente maggiore in direzione Saluzzo – Savigliano.

3.7 Esercizio svolto con il treno a idrogeno

In questo paragrafo viene ripercorso lo stesso esercizio, utilizzando però il treno ad idrogeno fornito da Alstom e descritto al capitolo 2. Come già accennato, il convoglio in questo caso è costituito da quattro casse, pertanto presenta una lunghezza, una massa nonché una capienza maggiori; esso è stato progettato per raggiungere la velocità di 140 km/h , e può trasportare fino ad un massimo di circa 506 persone (considerando sia i posti a sedere che un'occupazione di 4 pax/m^2). Per il calcolo della massa è stata considerata come base la massa della versione del treno Coradia Stream (soprannominato *Pop*) a cui sono state aggiunte circa 20 t per l'attrezzatura dell'idrogeno; a questo valore è stato aggiunto il carico dovuto ai passeggeri trasportati, e i calcoli sono stati effettuati considerando la condizione di carico massimo, con una massa pari a $201,65 \text{ t}$. Di seguito vengono riportate le curve di prestazione del mezzo:

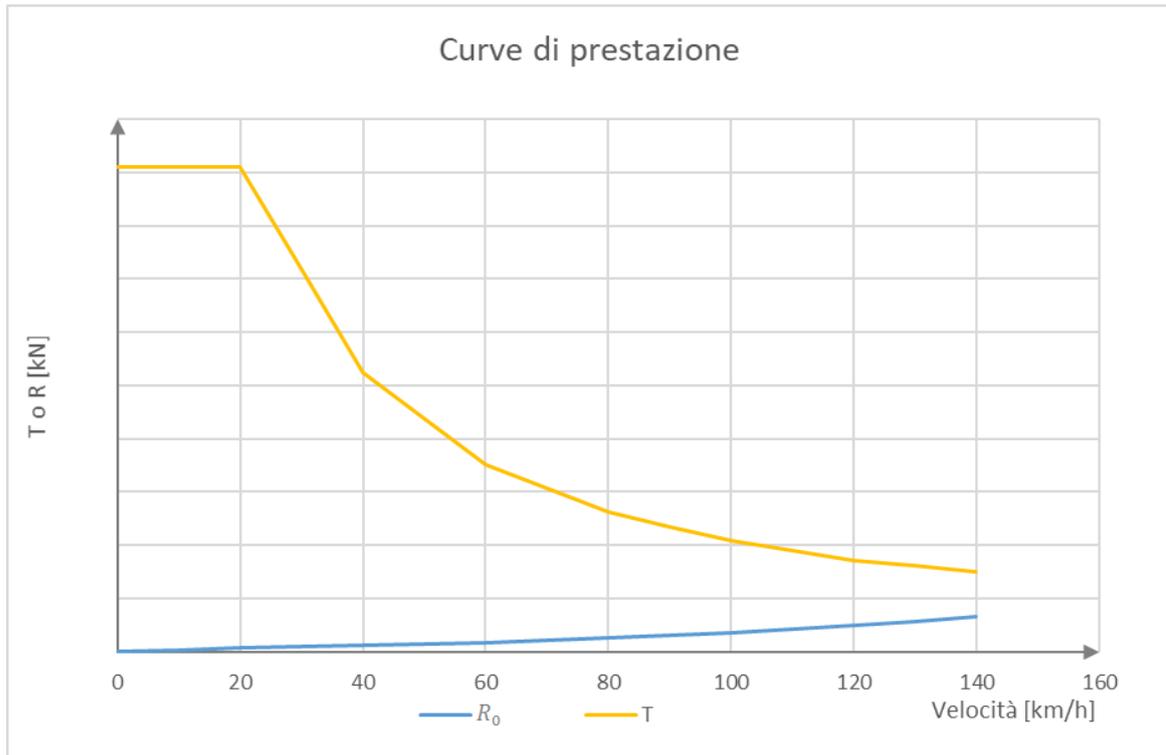


Figura 24: curve di prestazione del treno a idrogeno

In questo caso si osserva la presenza di un primo tratto in cui la forza di trazione è costante, fino alla velocità di circa 20 km/h , per poi decrescere esponenzialmente; in questo caso i valori di trazione risultano maggiori rispetto a quelli del Minuetto, dovuto al fatto che l'intero convoglio è più grande. Inoltre si possono notare i bassissimi valori di resistenza R_0 : in particolare l'intercetta con l'asse delle ordinate è pressoché nulla, il che denota un materiale molto nuovo e moderno, caratteristica peculiare del treno in esame.

Considerando intervalli di velocità di 5 km/h , di nuovo si svolge il calcolo con integrazione tabellare in entrambe le direzioni di marcia.

Savigliano – Saluzzo

Analogamente al caso precedente, in questa direzione come resistenza totale si considera, oltre quella ordinaria, quella opposta dalla livelletta del 4 ‰ e quella dovuta alla curva di raggio R_{c1} ; vengono riportate le curve di prestazione, con la rappresentazione della resistenza considerata:

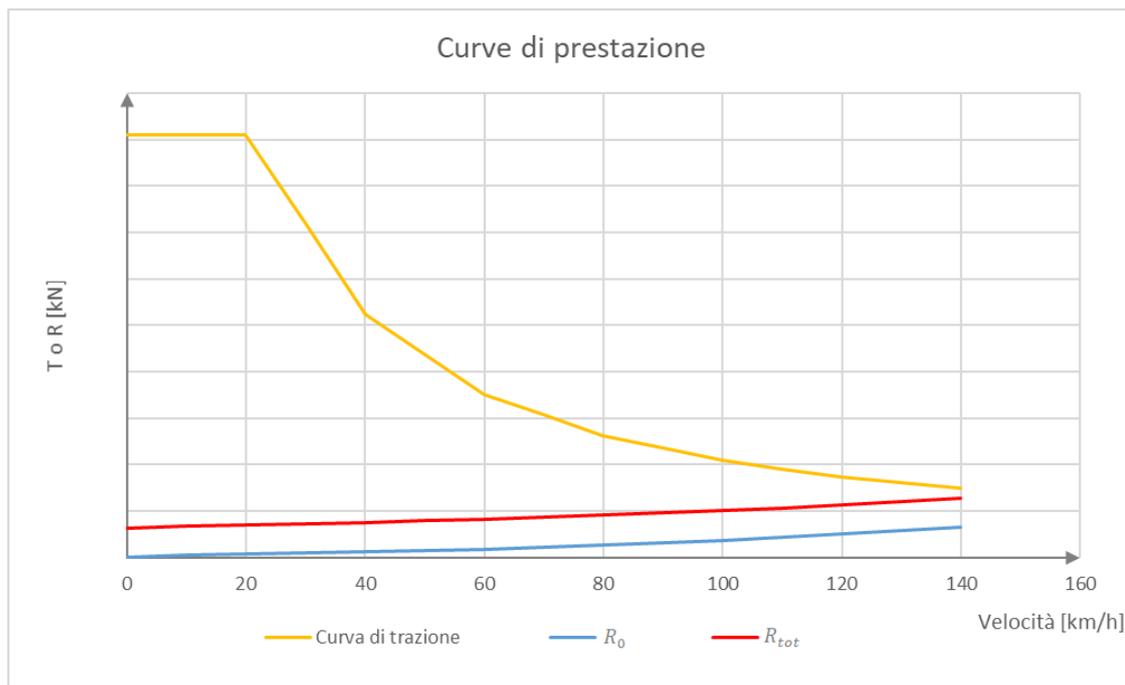


Figura 25: curve di prestazione del treno a idrogeno nella direzione Savigliano – Saluzzo

Come velocità di tracciato si considera di nuovo quella limite imposta dalla linea, pari a 80 km/h. Si riportano i calcoli relativi alla fase di accelerazione, considerando solo questa fase e quella di regimi ai fini del calcolo dei consumi.

Tabella 14: integrazione tabellare con treno a idrogeno in direzione Savigliano - Saluzzo

V [km/h]	T - R [kN]	a [m/s ²]	Δt [s]	Δs [m]	T [s]	S [m]
0	169,47	0,80	0	0	0	0
5	169,09	0,80	1,74	1,21	1,74	1,21
10	168,71	0,80	1,74	3,63	3,48	4,83
15	168,33	0,80	1,75	6,06	5,22	10,89
20	167,95	0,79	1,75	8,50	6,97	19,39
25	148,42	0,70	1,86	11,62	8,83	31,01
30	128,89	0,61	2,12	16,20	10,95	47,22
35	109,36	0,52	2,47	22,29	13,42	69,50
40	89,84	0,42	2,95	30,76	16,37	100,26
45	80,90	0,38	3,44	40,67	19,82	140,92
50	71,97	0,34	3,85	50,76	23,67	191,69
55	63,03	0,30	4,36	63,53	28,02	255,22

60	54,10	0,26	5,02	80,20	33,04	335,42
65	49,12	0,23	5,70	98,92	38,74	434,34
70	44,14	0,21	6,31	118,24	45,05	552,59
75	39,16	0,18	7,06	142,18	52,11	694,77
80	34,19	0,16	8,02	172,61	60,13	867,38

I valori relativi alla potenza, all'energia e quindi ai consumi risultano essere:

Tabella 15: consumi relativi al treno a idrogeno nella tratta Savigliano - Saluzzo

<i>V [km/h]</i>	<i>Potenza media [kW]</i>	<i>Energia [kWh]</i>	<i>Energia TOT [kWh]</i>	<i>Energia [kWh/seat · km]</i>
0	0	0	0	0
5	126,4611	0,0610	0,0610	0,1000
10	379,3833	0,1835	0,2445	0,1000
15	632,3056	0,3065	0,5510	0,1000
20	885,2278	0,4301	0,9811	0,1000
25	1071,0891	0,5531	1,5342	0,0941
30	1163,0651	0,6852	2,2194	0,0836
35	1201,3923	0,8238	3,0432	0,0731
40	1186,0708	0,9728	4,0160	0,0625
45	1183,8681	1,1328	5,1488	0,0551
50	1209,6212	1,2927	6,4415	0,0503
55	1211,4001	1,4660	7,9075	0,0456
60	1189,2047	1,6587	9,5662	0,0409
65	1180,2351	1,8681	11,4342	0,0373
70	1190,2146	2,0849	13,5192	0,0348
75	1187,6659	2,3291	15,8483	0,0324
80	1172,5891	2,6117	18,4599	0,0299
			TOT	1,039397972

La fase di regime è stata calcolata dalle considerazioni svolte per il Minuetto, a partire dalla formula UIC 544-1 per il calcolo dello spazio di arresto; per il calcolo di quest'ultimo di nuovo è stata considerata la livelletta pari al 17 ‰ e una percentuale di peso frenato uguale al caso precedente ($\lambda_c = 145\%$).

In questo modo si è ottenuto:

Tabella 16: valori di riferimento per la fase di regime in direzione Savigliano - Saluzzo

V [km/h]	S [m]	T [s]	Potenza [kW]	Energia [kWh]	Energia [kWh/seat · km]
80	13794,45	620,75	1161,92	200,35	0,028

Riassumendo le caratteristiche ottenute:

Tabella 17: caratteristiche principali ottenute con il treno a idrogeno nella direzione Savigliano - Saluzzo

a_{media} [m/s^2]	0,49
Spazio di accelerazione [m]	867,38
Tempo di accelerazione [s]	60,13
Energia Totale spesa (accelerazione + regime) [kWh]	218,81
Energia Totale (acc. + regime) [kWh/seat · km]	1,07

Saluzzo – Savigliano

In questa direzione, le caratteristiche di resistenza dovuta al tracciato sono:

- $i = 1 ‰$
- $R_{c2} = 209 m.$

Si riportano le curve di prestazione con le resistenze del caso:

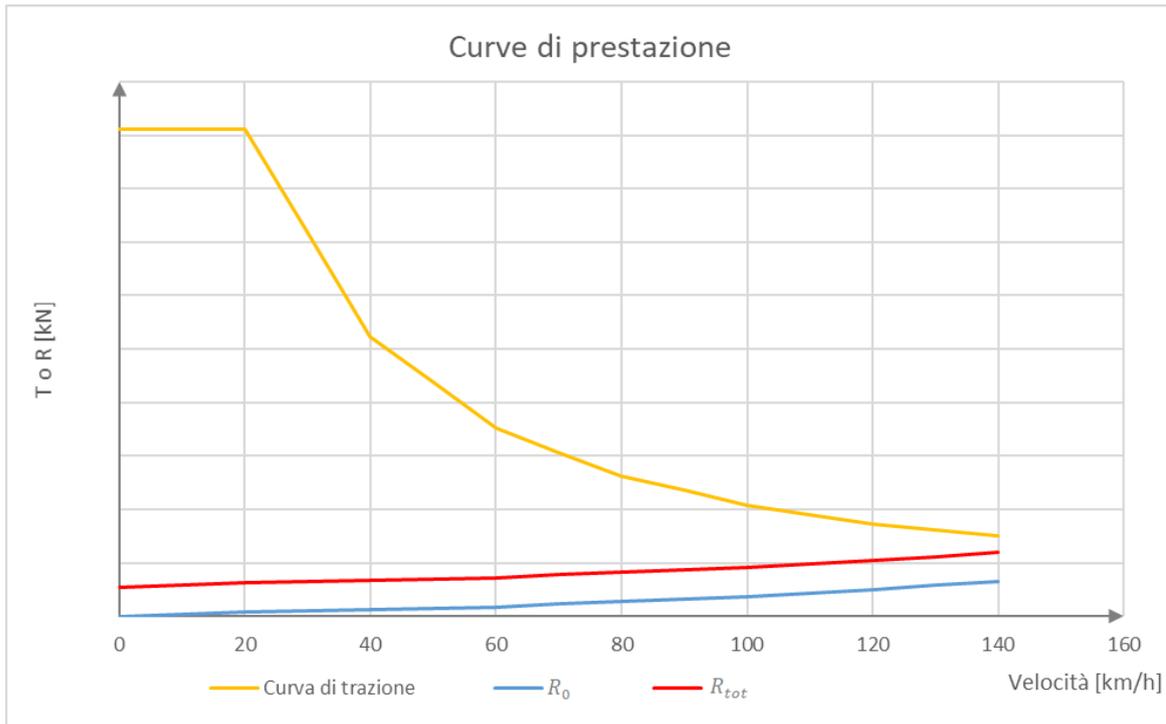


Figura 26: curve di prestazione del treno a idrogeno nella direzione Saluzzo – Savigliano

Analogamente alle considerazioni sopra svolte, la velocità di regime è $V = 80 \text{ km/h}$.

In fase di accelerazione si avrà:

Tabella 18: integrazione tabellare con treno a idrogeno in direzione Saluzzo - Savigliano

$V \text{ [km/h]}$	$T - R \text{ [kN]}$	$a \text{ [m/s}^2\text{]}$	$\Delta t \text{ [s]}$	$\Delta s \text{ [m]}$	$T \text{ [s]}$	$S \text{ [m]}$
0	171,20	0,81	0	0	0	0
5	170,81	0,81	1,72	1,19	1,72	1,19
10	170,43	0,80	1,72	3,59	3,44	4,78
15	170,05	0,80	1,73	6,00	5,17	10,78
20	169,67	0,80	1,73	8,42	6,90	19,20
25	150,14	0,71	1,84	11,49	8,74	30,69
30	130,61	0,62	2,09	16,00	10,84	46,70
35	111,09	0,52	2,43	21,97	13,27	68,66
40	91,56	0,43	2,90	30,23	16,17	98,90
45	82,62	0,39	3,38	39,86	19,55	138,76
50	73,69	0,35	3,76	49,65	23,31	188,40
55	64,76	0,31	4,25	61,95	27,56	250,36
60	55,82	0,26	4,88	77,91	32,44	328,27

65	50,84	0,24	5,51	95,73	37,95	424,00
70	45,87	0,22	6,08	114,03	44,03	538,03
75	40,89	0,19	6,78	136,53	50,81	674,56
80	35,91	0,17	7,66	164,87	58,47	839,43

I dati relativi potenza, energia e consumi sono di seguito riportati:

Tabella 19: consumi relativi al Minuetto nella tratta Saluzzo - Savigliano

<i>V [km/h]</i>	<i>Potenza media [kW]</i>	<i>Energia [kWh]</i>	<i>Energia TOT [kwh]</i>	<i>Energia [kwh/seat · km]</i>
0	0	0	0	0
5	126,4611	0,0604	0,0604	0,1000
10	379,3833	0,1816	0,2420	0,1000
15	632,3056	0,3034	0,5454	0,1000
20	885,2278	0,4257	0,9712	0,1000
25	1071,0891	0,5472	1,5183	0,0941
30	1163,0651	0,6768	2,1951	0,0836
35	1201,3923	0,8121	3,0072	0,0731
40	1186,0708	0,9562	3,9634	0,0625
45	1183,8681	1,1104	5,0738	0,0551
50	1209,6212	1,2643	6,3380	0,0503
55	1211,4001	1,4295	7,7676	0,0456
60	1189,2047	1,6113	9,3789	0,0409
65	1180,2351	1,8077	11,1866	0,0373
70	1190,2146	2,0107	13,1973	0,0348
75	1187,6659	2,2366	15,4339	0,0324
80	1172,5891	2,4945	17,9285	0,0299
			TOT	1,0394

La fase di regime dà i seguenti risultati:

Tabella 20: valori di riferimento per la fase di regime in direzione Saluzzo - Savigliano

<i>V [km/h]</i>	<i>S [m]</i>	<i>T [s]</i>	<i>Potenza [kW]</i>	<i>Energia [kWh]</i>	<i>Energia [kWh/seat · km]</i>
80	13822,39	622,00	1161,92	200,76	0,029

Si riportano quindi i dati principali:

Tabella 21: caratteristiche principali ottenute

$a_{media} [m/s^2]$	0,5
Spazio di accelerazione [m]	839,43
Tempo di accelerazione [s]	58,47
Energia Totale spesa (accelerazione + regime) [kWh]	218,69
Energia Totale (acc. + regime) [kWh/seat · km]	1,07

Di nuovo, nelle due direzioni i valori di consumi in termini di $kWh/seat \cdot km$ risultano uguali. Si possono osservare in questo caso le migliori prestazioni in accelerazione proprie di questo convoglio, che permettono di raggiungere la velocità di regime in spazi e tempi minori. Questo comporta tuttavia un maggiore utilizzo di energia, dovuto al fatto che anche le masse in gioco sono maggiori, e fanno aumentare anche le resistenze che oppone il tracciato. Analogamente all'esercizio svolto con il Minuetto, la direzione Saluzzo – Savigliano permette di raggiungere un valore di accelerazione maggiore.

3.8 Esercizio svolto con il tram – treno

A causa della difficoltà nel reperire i dati con le caratteristiche del mezzo tram – treno, che in Italia non viene utilizzato, si è scelto di considerare le caratteristiche relative ad un tram pesante, anche classificabile come metropolitana leggera, che con buona approssimazione possono essere molto vicine a quelle di un tram – treno. Il veicolo è progettato per percorrere curve con raggio minimo di 25 m e pendenza superabile del 50 ‰; la velocità massima raggiungibile è 70 km/h e il numero totale di passeggeri trasportabili, considerando un'occupazione di $6pax/m^2$, è pari a 290. Anche in questo caso i calcoli sono stati effettuati nelle condizioni di carico massimo, dunque la massa risulta pari a 62,8 t, valore molto inferiore rispetto ai due casi precedenti.

Per il calcolo delle resistenze ordinarie al moto è stata considerata la formula binomia:

$$r_0 \left[\frac{N}{kN} \right] = a + b \cdot V^2$$

I coefficienti a e b sono stati presi in riferimento al valore dato per Light material trains (Italy):

- $a = 1,9$;
- $b = 0,00027$.

Di seguito vengono riportate le curve di prestazione:

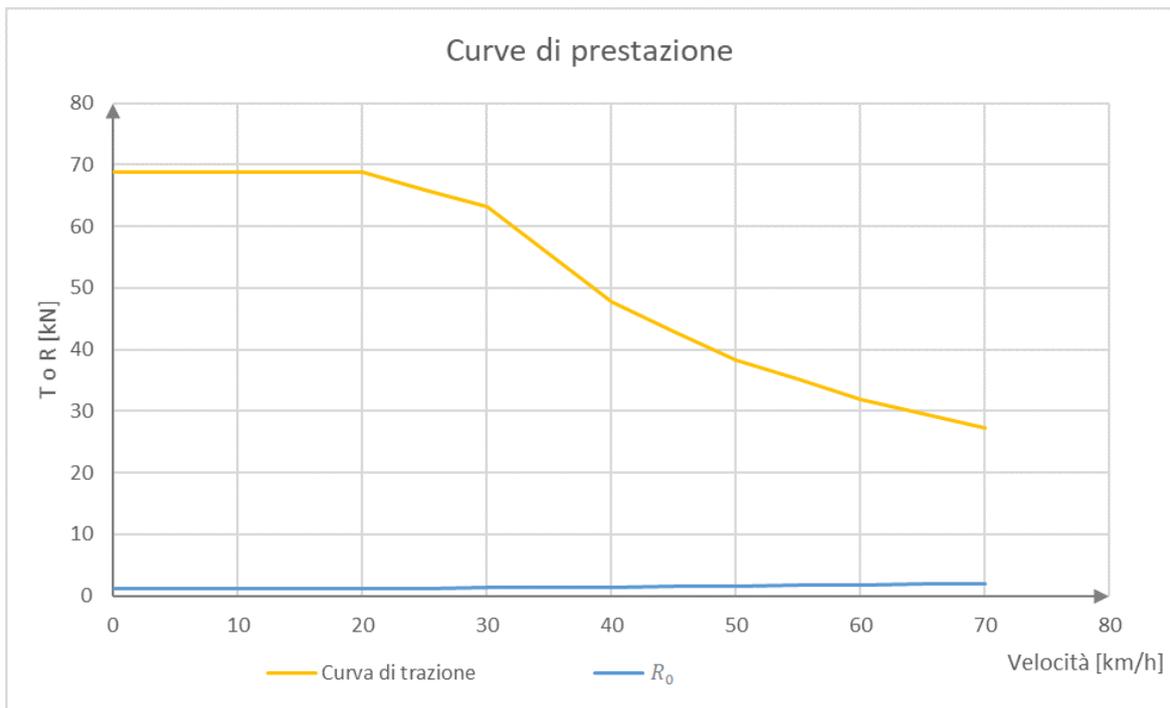


Figura 27: curve di prestazione del tram pesante

Disponendo in questo caso dell'esatta caratteristica di frenatura del tram, è stata calcolata anche la fase di frenatura, in modo da ottenere il diagramma del moto; di nuovo questa, insieme alla fase di coasting, non è stata considerata ai fini del calcolo dei consumi.

Savigliano – Saluzzo

Le caratteristiche del tracciato in questa direzione sono le medesime dei casi precedenti, pertanto si riporta l'andamento della resistenza totale presa in esame:

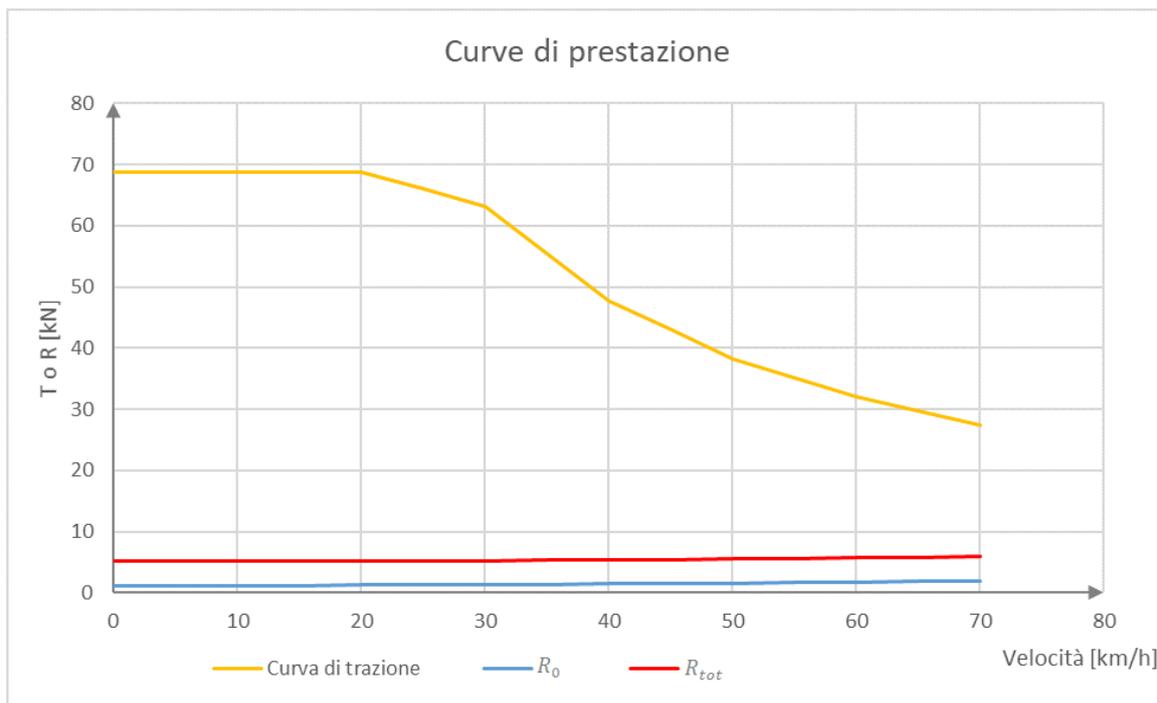


Figura 28: curve di trazione del tram pesante nella direzione Savigliano – Saluzzo

È stata di nuovo eseguita l'integrazione tabellare, con intervallo di velocità pari a 5 km/h, sia per la fase di accelerazione che per quella di frenatura; per il calcolo della massa equivalente (m_e), necessaria ai fini dell'applicazione dell'equazione del moto, è stato considerato un valore $\beta = 0,12$, tipico dei tram.

Si riportano i calcoli relativi alla fase di accelerazione:

Tabella 22: integrazione tabellare con tram pesante in direzione Savigliano - Saluzzo

V [km/h]	$T - R$ [kN]	a [m/s ²]	Δt [s]	Δs [m]	T [s]	S [m]
0	63,74	0,91	0	0	0	0
5	63,73	0,91	1,53	1,06	1,53	1,06
10	63,72	0,91	1,53	3,19	3,07	4,26
15	63,70	0,91	1,53	5,33	4,60	9,58
20	63,67	0,91	1,53	7,46	6,13	17,04
25	60,80	0,86	1,61	10,04	7,74	27,08
30	57,92	0,82	1,69	12,88	9,43	39,97
35	50,14	0,71	1,95	17,59	11,38	57,56
40	42,34	0,60	2,31	24,03	13,68	81,59

45	37,57	0,53	2,60	30,70	16,28	112,29
50	32,78	0,47	2,98	39,32	19,26	151,61
55	29,54	0,42	3,31	48,23	22,57	199,84
60	26,29	0,37	3,72	59,36	26,29	259,20
65	23,86	0,34	4,10	71,09	30,38	330,30
70	21,42	0,30	4,56	85,52	34,94	415,82

I valori relativi alla potenza, all'energia e ai consumi sono:

Tabella 23: consumi relativi al treno a idrogeno nella tratta Savigliano - Saluzzo

<i>V [km/h]</i>	<i>Potenza media [kW]</i>	<i>Energia [kWh]</i>	<i>Energia TOT [kWh]</i>	<i>Energia [kWh/seat · km]</i>
0	0	0	0	0
5	47,8050	0,0204	0,0204	0,0659
10	143,4149	0,0611	0,0814	0,0659
15	239,0248	0,1018	0,1833	0,0659
20	334,6347	0,1426	0,3259	0,0659
25	420,4110	0,1876	0,5135	0,0644
30	492,4205	0,2307	0,7442	0,0617
35	532,7500	0,2883	1,0326	0,0565
40	534,5957	0,3426	1,3751	0,0492
45	533,8656	0,3856	1,7608	0,0433
50	534,7594	0,4427	2,2035	0,0388
55	534,4293	0,4910	2,6945	0,0351
60	535,0300	0,5523	3,2468	0,0321
65	534,3515	0,6078	3,8546	0,0295
70	533,5456	0,6760	4,5306	0,0273
			TOT	0,7017

La fase di frenatura è stata calcolata a partire dalla curva che riporta i valori della forza di frenatura alle diverse velocità, di seguito riportata:

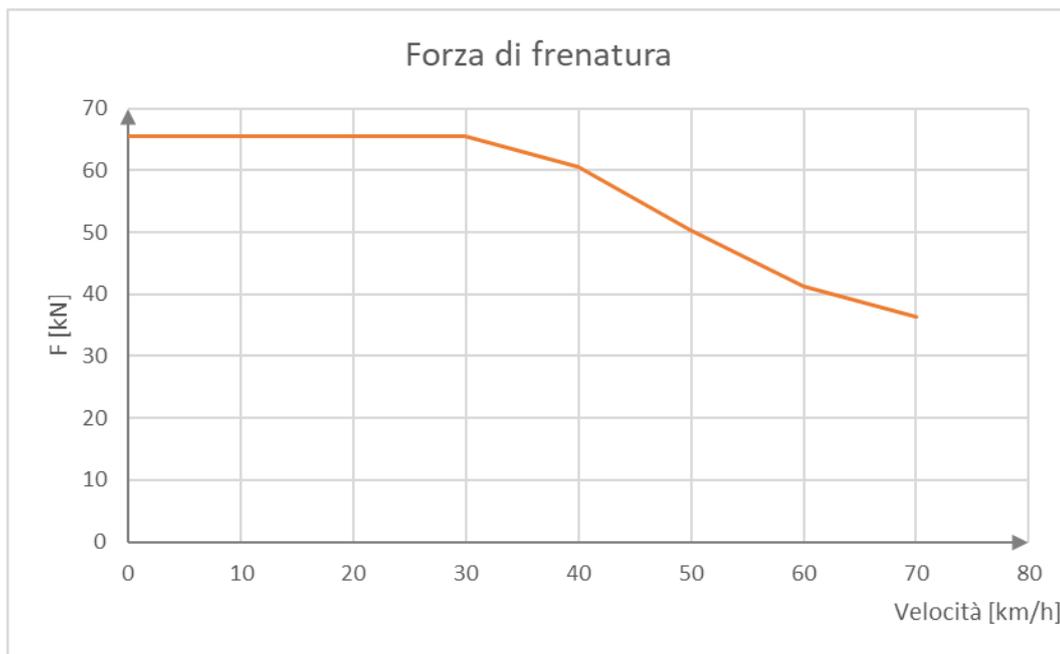


Figura 29: forza di frenatura relativa al tram pesante

In questo caso è stata applicata l'equazione del moto relativa alla frenatura: $-F - R = m_e \cdot dv/dt$.

I valori ottenuti sono di seguito riportati.

Tabella 24: integrazione tabellare in fase di frenatura del tram pesante

V [km/h]	$F + R$ [kN]	d [m/s ²]	Δt [s]	Δs [m]	T [s]	S [m]
0	50,69	0,72	0	0	0	0
5	53,23	0,76	1,84	34,41	1,84	34,41
10	55,78	0,79	1,75	30,40	3,59	64,81
15	60,29	0,86	1,62	25,88	5,21	90,69
20	64,80	0,92	1,51	21,98	6,71	112,68
25	69,93	0,99	1,40	18,43	8,11	131,11
30	75,06	1,07	1,30	15,37	9,41	146,48
35	77,63	1,10	1,26	13,11	10,67	159,59
40	80,22	1,14	1,22	10,99	11,89	170,58
45	80,29	1,14	1,22	9,29	13,11	179,87
50	80,37	1,14	1,22	7,60	14,32	187,47
55	80,45	1,14	1,21	5,90	15,54	193,37
60	80,55	1,15	1,21	4,21	16,75	197,59
65	80,65	1,15	1,21	2,52	17,96	200,11

70	80,76	1,15	1,21	0,84	19,17	200,95
----	-------	------	------	------	-------	--------

Per la fase di regime si è ottenuto:

Tabella 25: valori di riferimento per la fase di regime in direzione Savigliano - Saluzzo

V [km/h]	S [m]	T [s]	Potenza [kW]	Energia [kWh]	Energia [kWh/seat · km]
80	14263,23	733,54	531,53	108,30	0,03

Il diagramma del moto è in questo caso:

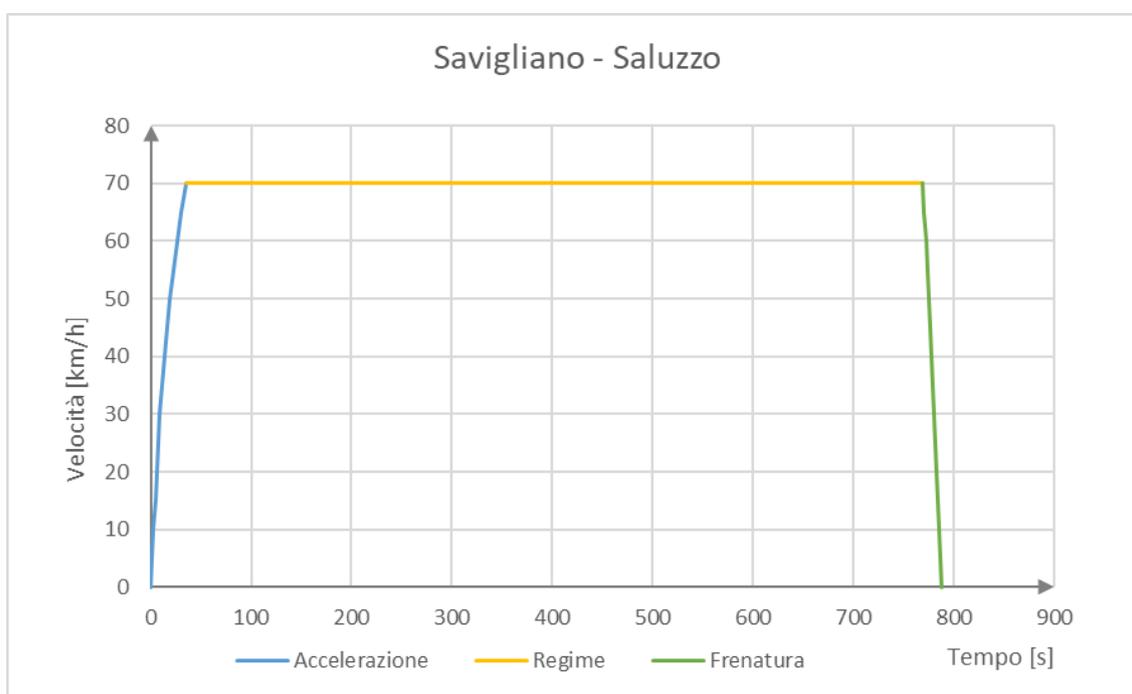


Figura 30: diagramma del moto del tram nella direzione Savigliano - Saluzzo

Infine vengono riportate le caratteristiche principali ottenute:

Tabella 26: caratteristiche principali ottenute con il tram pesante nella direzione Savigliano - Saluzzo

$a_{media} [m/s^2]$	0,66
$d_{media} [m/s^2]$	1,01
Spazio di accelerazione [m]	415,82
Tempo di accelerazione [s]	34,94
Spazio di decelerazione [m]	200,95
Tempo di decelerazione [s]	19,17
Energia Totale spesa (accelerazione + regime) [kWh]	112,83
Energia Totale (acc. + regime) [kWh/seat · km]	0,73

Saluzzo – Savigliano

Nuovamente, in questa direzione si considera la livelletta pari all'1 ‰ e la curva di raggio R_{c2} : la resistenza totale viene calcolata considerando queste resistenze aggiuntive:

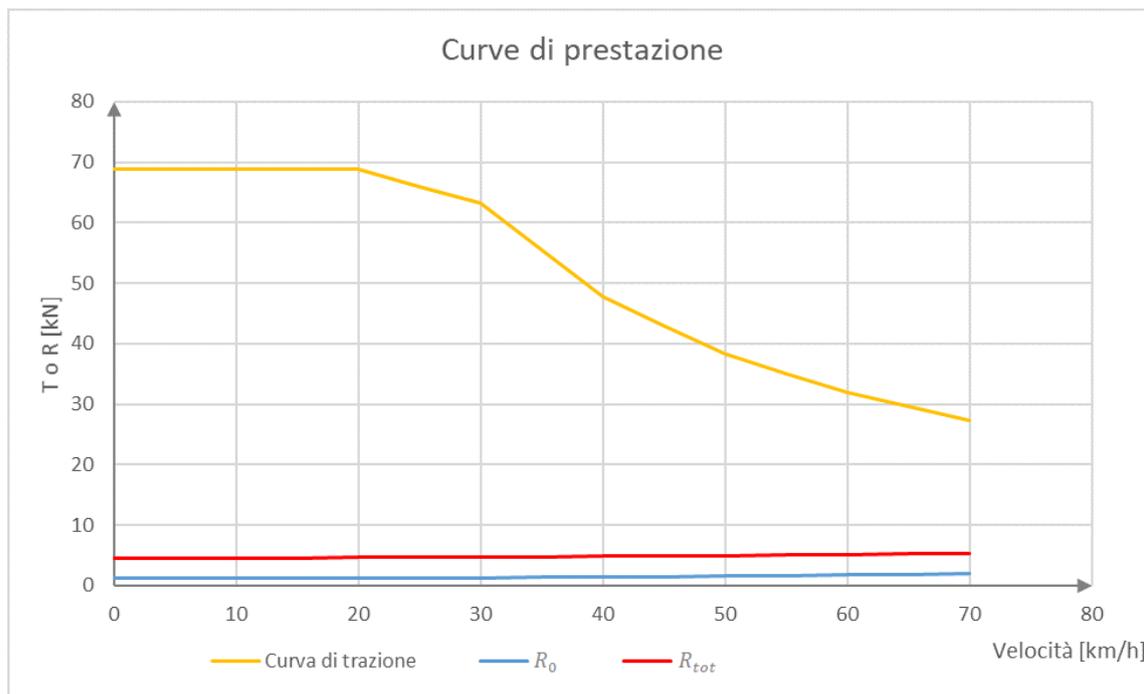


Figura 31: curve di prestazione del tram in direzione Saluzzo - Savigliano

Fase di accelerazione:

Tabella 27: integrazione tabellare con tram pesante in direzione Saluzzo - Savigliano

V [km/h]	T - R [kN]	a [m/s ²]	Δt [s]	Δs [m]	T [s]	S [m]
0	64,27	0,91	0	0	0	0
5	64,27	0,91	1,52	1,06	1,52	1,06
10	64,26	0,91	1,52	3,17	3,04	4,22
15	64,23	0,91	1,52	5,28	4,56	9,50
20	64,21	0,91	1,52	7,40	6,08	16,90
25	61,34	0,87	1,59	9,95	7,68	26,85
30	58,46	0,83	1,67	12,77	9,35	39,62
35	50,67	0,72	1,93	17,40	11,27	57,02
40	42,88	0,61	2,28	23,73	13,55	80,75
45	38,10	0,54	2,56	30,27	16,12	111,02
50	33,32	0,47	2,93	38,69	19,05	149,71
55	30,07	0,43	3,25	47,37	22,30	197,08
60	26,82	0,38	3,64	58,17	25,94	255,26
65	24,39	0,35	4,00	69,53	29,94	324,79
70	21,95	0,31	4,45	83,44	34,39	408,22

I valori relativi alla potenza, all'energia e ai consumi sono:

Tabella 28: consumi relativi al treno a idrogeno nella tratta Saluzzo - Savigliano

V [km/h]	Potenza media [kW]	Energia [kWh]	Energia TOT [kWh]	Energia [kWh/seat · km]
0	0	0	0	0
5	47,8050	0,0202	0,0202	0,0659
10	143,4149	0,0606	0,0808	0,0659
15	239,0248	0,1010	0,1817	0,0659
20	334,6347	0,1414	0,3232	0,0659
25	420,4110	0,1860	0,5092	0,0644
30	492,4205	0,2286	0,7377	0,0617
35	532,7500	0,2853	1,0230	0,0565
40	534,5957	0,3383	1,3613	0,0492
45	533,8656	0,3802	1,7415	0,0433
50	534,7594	0,4356	2,1771	0,0388
55	534,4293	0,4822	2,6593	0,0351
60	535,0300	0,5413	3,2006	0,0321
65	534,3515	0,5945	3,7951	0,0295
70	533,5456	0,6595	4,4546	0,0273
			TOT	0,7017

Fase di frenatura:

Tabella 29: integrazione tabellare in fase di frenatura del tram pesante

V [km/h]	$F + R$ [kN]	d [m/s^2]	Δt [s]	Δs [m]	T [s]	S [m]
0	38,90	0,55	0	0	0	0
5	41,44	0,59	2,36	44,20	2,36	44,20
10	44,00	0,63	2,22	38,55	4,58	82,74
15	48,50	0,69	2,01	32,17	6,59	114,91
20	53,02	0,75	1,84	26,87	8,43	141,78
25	58,14	0,83	1,68	22,17	10,11	163,95
30	63,27	0,90	1,54	18,23	11,66	182,18
35	65,85	0,94	1,48	15,45	13,14	197,63
40	68,43	0,97	1,43	12,89	14,57	210,52
45	68,50	0,97	1,43	10,89	16,00	221,41

50	68,58	0,98	1,42	8,90	17,42	230,32
55	68,67	0,98	1,42	6,92	18,84	237,23
60	68,76	0,98	1,42	4,93	20,26	242,17
65	68,87	0,98	1,42	2,96	21,68	245,12
70	68,98	0,98	1,42	0,98	23,10	246,10

Per la fase di regime si è ottenuto:

Tabella 30: valori di riferimento per la fase di regime in direzione Savigliano - Saluzzo

V [km/h]	S [m]	T [s]	Potenza [kW]	Energia [kWh]	Energia [kWh/seat · km]
80	14225,67	731,61	531,53	108,02	0,03

È possibile tracciare il grafico relativo alla marcia del veicolo lungo la tratta considerata:

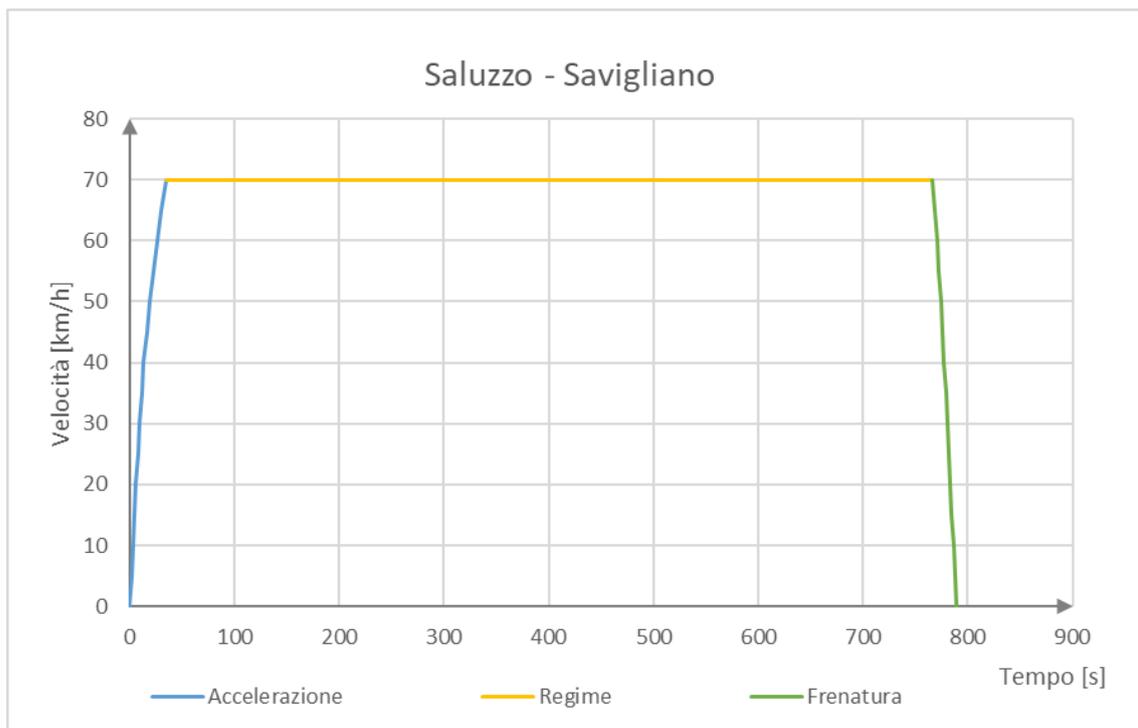


Figura 32: diagramma del moto del tram nella direzione Saluzzo - Savigliano

Riassumendo le caratteristiche principali ottenute:

Tabella 31: caratteristiche principali ottenute con il tram pesante nella direzione Savigliano - Saluzzo

$a_{media} [m/s^2]$	0,67
$d_{media} [m/s^2]$	0,85
Spazio di accelerazione [m]	408,22
Tempo di accelerazione [s]	34,39
Spazio di decelerazione [m]	246,10
Tempo di decelerazione [s]	23,10
Energia Totale spesa (accelerazione + regime) [kWh]	112,47
Energia Totale (acc. + regime) [kWh/seat · km]	0,73

In primo luogo si può osservare come, anche in questo caso, i consumi in entrambe le direzioni risultano uguali; inoltre, il valore di decelerazione media nella direzione Saluzzo – Savigliano risulta abbastanza più contenuto di quello nella direzione opposta: questo è dovuto al fatto che, in direzione Savigliano – Saluzzo, in prossimità della stazione di Saluzzo è presente una livelletta del 17 ‰, che in questo caso è favorevole nei confronti della frenatura, permettendo di arrestare il convoglio in spazi minori.

In relazione ai dati complessivi ottenuti, considerando anche gli altri due convogli considerati, si può osservare come in entrambe le direzioni le prestazioni risultano molto maggiori rispetto ai due casi precedenti: le accelerazioni raggiunte sono più grandi, di conseguenza gli spazi e i tempi di accelerazione risultano più contenuti; questo è dovuto al fatto che il materiale rotabile utilizzato è di molto più leggero rispetto a quello utilizzato per il servizio ferroviario, pari alla metà circa del treno Minuetto, e un terzo del treno ad idrogeno. Questo incide anche sui consumi, che si dimostrano di gran lunga più bassi rispetto ai due casi precedenti. I risultati ottenuti hanno confermato le migliori prestazioni di un rotabile leggero come il tram – treno rispetto ad un treno tradizionale, soprattutto in relazione a tratte di esigua lunghezza e non elevati livelli di domanda da soddisfare.

4. ANALISI MULTICRITERI E CONCLUSIONI

4.1. *Metodi di analisi multicriteri: generalità*

La fase finale del processo di pianificazione di un sistema di trasporto consiste nel valutare gli scenari proposti, quindi trovare la migliore alternativa che soddisfi le esigenze che stanno alla base della richiesta. Come primo passaggio della valutazione è necessario valutare gli impatti, che possono essere interni, ovvero quelli che influenzano la domanda e l'offerta, ed esterni, che ricadono invece sulla comunità, anche su coloro i quali non usufruiscono del sistema di trasporto; tra gli impatti esterni, generalmente quelli che vengono considerati sono: congestione, sicurezza, qualità dell'aria, gas serra e rumore. Come seconda fase è necessario quantificare gli impatti, ovvero misurarli con la propria unità di misura, ad esempio per misurare la congestione si potrebbe considerare il tempo di spostamento nel sistema, per misurare l'incidentalità e quindi la sicurezza si può considerare il numero di persone morte o ferite in seguito agli incidenti con il sistema di trasporto considerato; altre variabili ancora risultano difficili da quantificare nella loro unità di misura, ma piuttosto potrebbero essere espresse in una scala di valutazione. Appare chiaro dunque che vi è una molteplicità di aspetti da mettere a confronto, e il fatto che siano misurati in maniera diversa non sempre permette di effettuare un'analisi e una scelta in maniera coerente. Per questo motivo si è soliti ricondurre tutte le grandezze ad un'unica unità di misura, che è il denaro: questa fase consiste nella monetizzazione degli impatti, necessaria per poter applicare un'analisi costi – benefici, che è un metodo quantitativo spesso utilizzato nella valutazione dei trasporti. Tuttavia, il monetizzare i diversi impatti costituisce un limite: non sempre è facile fare ciò, ad esempio il fatto di dover dare un valore in euro alla vita umana non è una cosa che riscuote tanto successo [33]. I metodi di analisi multicriterio (AMC) hanno il vantaggio di saltare questa fase e considerare gli impatti ciascuno con la propria unità di misura, che può essere sia qualitativa che quantitativa; sarà possibile pertanto considerare facilmente diversi aspetti, non solo di carattere economico, e quindi monetizzabili, ma anche di carattere sociale, ambientale e territoriale, misurati in termini fisici o qualitativi [34]. La tecnica è particolarmente adatta quando è necessario eseguire una valutazione eterogenea, basata cioè su più giudizi incentrati

su criteri differenti; il processo viene quindi reso razionale e oggettivo, e offre una base per aiutare nella decisione e orientare la scelta del decisore. La valutazione finale consiste nel confrontare e ordinare l'insieme di alternative sulla base dei criteri proposti, ciascuno preso in esame con il relativo peso, che misura l'importanza di quel criterio nel formulare la valutazione finale; una certa combinazione di pesi costituisce un "punto di vista": diversi decisori possono infatti avere punti di vista differenti, oppure in base al diverso obiettivo da perseguire può essere più utile considerare un punto di vista piuttosto che un altro [34]. Un'analisi multicriteri è descritta da una matrice, che prende il nome di "matrice di decisione", le cui righe rappresentano le diverse alternative e le colonne i criteri di giudizio definiti in relazione ai diversi obiettivi (sistema degli obiettivi), fissati dal decisore; il generico elemento all'interno della matrice indica la misura di rispondenza che quella alternativa ha nei confronti del criterio considerato [34].

Ai fini di una valutazione corretta, l'insieme dei criteri deve essere [35]:

- Significativo, rispetto al contesto in cui si deve risolvere il problema e agli obiettivi che esprime il decisore;
- Comune a tutte le alternative;
- Adatto a rappresentare le preferenze.

4.1.1 Classificazione

Una prima distinzione tra i metodi che utilizzano AMC riguarda il numero di alternative e criteri che si possono considerare: esso può essere finito o infinito, il che darà luogo rispettivamente a metodi AMC discreti o a metodi continui; inoltre si differenzia anche in base alla tipologia di dati acquisiti: soft, dati qualitativi, e hard, dati quantitativi [34].

La prima classificazione da considerare riguarda la tipologia di informazioni utilizzate, pertanto si avranno:

- Metodi qualitativi, vengono utilizzati quando vi è l'impossibilità di quantificare gli aspetti necessari per la scelta finale;

- Metodi quantitativi, in cui i dati sono quantificabili e ciascuno espresso nella propria unità di misura, e le varie alternative vengono confrontate con algoritmi differenti, ottenendo una graduatoria di preferenze; tra questi, i più famosi sono i metodi Electre;
- Metodi di elaborazione su dati misti, in cui vengono utilizzati sia dati qualitativi che quantitativi, sviluppando due processi separati paralleli per ciascuna tipologia di dati; per confrontarli è poi necessario trasformarli in misure standard, per poi procedere ad una aggregazione dei criteri.

Una seconda classificazione si basa sul tipo di algoritmo utilizzato per confrontare le diverse alternative ed elaborare poi la matrice di valutazione; si avranno [34]:

- Aggregazione dei criteri in uno solo: tutti i criteri vengono aggregati in un unico valore per ogni alternativa; talvolta tale tecnica risulta molto riduttiva, specie per valutare un problema di trasporto, in quanto i diversi aspetti del problema perdono di significato;
- Tecniche di analisi disaggregata, in cui è necessario esplicitare obiettivi, criteri e alternative e quantificarli anche se non lo sono direttamente, ed esprimere inoltre un'efficacia dell'alternativa rispetto al criterio considerato; quello che infine si ottiene è un quadro in cui vengono riassunti gli elementi di analisi, ma non un ordine di preferenza delle alternative;
- Ricerca interattiva del miglior compromesso, in cui il decisore è chiamato a dialogare con il sistema nella successione delle fasi di calcolo, aggiungendo ulteriori informazioni sulle proprie preferenze e sui reali pesi dei criteri;
- Tecnica del confronto a coppie, in cui le alternative vengono confrontate a due a due, costruendo relazioni di dominanza, e alla fine si ottiene la gerarchia delle preferenze. Di questa tecnica si avvale il metodo Electre, di cui si parlerà nel seguito.

Nel caso in esame, come avviene generalmente per la risoluzione di problemi di trasporto, non si utilizzano metodi disaggregati in quanto la loro valutazione è troppo soggettiva [34] e potrebbe portare al discostamento dagli obiettivi reali; si utilizzano metodi quantitativi, in quanto i dati in

questione sono facilmente misurabili; non si utilizza il metodo di aggregazione dei criteri perché non adatto alla risoluzione del problema.

4.2. Electre

I metodi Electre (“Elimination et choix traduisant la Réalité” – Eliminazione e scelta che esprimono la realtà) sono metodi di aggregazione delle preferenze mediante la relazione di surclassamento, e sono stati sviluppati dal professor Bernard Roy a partire dal 1968, e costituiscono una famiglia di quattro metodi nati successivamente: Electre I (Roy, 1968), Electre II (Roy, Bertier, 1972), Electre III (Roy, 1979), Electre IV (Roy, Hugonnard, 1983). Tutti i metodi sono applicabili a un insieme finito di azioni, indicato con $A = (a_1, \dots, a_i, \dots, a_m)$, valutate con una famiglia coerente di criteri $g = (g_j/j = 1, \dots, n)$ [34]. I metodi si differenziano per le diverse problematiche affrontate: scelta per il primo e possibile per il secondo e per il terzo, ordinamento per il II, III e IV, cernita possibile per il secondo e per il terzo; si differenziano inoltre per la procedura di modellizzazione del surclassamento, che può essere definito (per il I e il II), o sfumato (fuzzy, per gli ultimi due metodi). In base alla natura delle scale di valutazione (ordinali o cardinali) e al tipo di criteri utilizzati (veri criteri come per i primi due, pseudo – criteri per il terzo e per il quarto), i metodi possono chiedere informazioni aggiuntive (soggettive), quali ad esempio: importanza relativa dei criteri, livelli di maggioranza, soglie di veto o altre informazioni [34] [35].

Tutti e quattro i metodi si articolano in due fasi: nella prima fase si procede alla modellizzazione della relazione di surclassamento, confrontando le alternative a coppie su ogni singolo criterio attraverso la differenza delle valutazioni in modo da stabilire una relazione di preferenza; si aggregano poi i risultati mediante l’applicazione di test di concordanza e di non discordanza, condizioni alla base della relazione di surclassamento; alla fine della prima fase si ottiene il grafico di surclassamento.

Nella seconda fase si applica la procedura di classificazione delle azioni relativa alla problematica in esame, a partire dal grafico di surclassamento.

Relazione di surclassamento

La relazione di surclassamento viene costruita indipendentemente per ogni coppia di alternative; date le alternative a e a' , il surclassamento S è definito come segue:

- $a S a'$ (a surclassa a') se esistono elementi sufficienti per affermare che a ha prestazioni buone almeno quanto a' sugli n criteri e non ci sono buone ragioni per affermare il contrario;
- $a - S a'$, se non sussistono le condizioni sopra scritte.

Pertanto si potranno avere diverse situazioni:

1. $a S a'$ e $a' S a \Rightarrow a I a'$, a è indifferente ad a' ;
2. $a S a'$ e $a' - S a \Rightarrow a P a'$, a è preferibile ad a' ;
3. $a - S a'$ e $a' S a \Rightarrow a' P a$, a' è preferibile ad a
4. $a - S a'$ e $a' - S a \Rightarrow a N a'$, a ed a' sono incomparabili.

L'ultima situazione corrisponde ad alternative che, su sottoinsiemi complementari di criteri, siano l'una preferibile all'altra ma senza che tali differenze permettano di sceglierne una piuttosto che un'altra [34], in altre parole non vi sono informazioni sufficienti tali da esprimere una preferenza su una delle due alternative. Questo è possibile in quanto la relazione di surclassamento assume carattere non compensativo, infatti indica solo quale delle due alternative è preferibile all'altra, senza considerare il valore effettivo di scarto tra i due giudizi; per sopperire a questa mancanza vengono introdotte delle condizioni di "veto", che servono a non far passare la relazione di surclassamento di un'alternativa su di un'altra qualora lo scarto sul determinato criterio su cui si è posto il veto risulti eccessivo.

Test di concordanza

Per effettuare questo test si confrontano tutte le coppie, criterio per criterio, e per ciascuna coppia si suddivide l'insieme J dei criteri in tre sottoinsiemi [34]:

1. $J_+(a, a') = \{j \in J: g_j(a) > g_j(a')\}$, è l'insieme di tutti i criteri in concordanza con l'affermazione “ a è preferibile ad a' ”;
2. $J_=(a, a') = \{j \in J: g_j(a) = g_j(a')\}$, è l'insieme di tutti i criteri per cui a ed a' sono indifferenti;
3. $J_-(a, a') = \{j \in J: g_j(a) < g_j(a')\}$, è l'insieme di tutti i criteri in discordanza con l'affermazione “ a è preferibile ad a' ”.

Il test serve a verificare che l'importanza relativa di questi tre sottoinsiemi, misurata attraverso i pesi che vengono attribuiti ai criteri, sia compatibile con l'ipotesi che “ a surclassi a' ”. Noto il peso $p_j \geq 0, j \in J$ relativo al j -esimo criterio, si indica con P la somma dei pesi:

$$P = \sum_{j \in J} p_j; \quad P = 1 \text{ se i pesi sono normalizzati} \Rightarrow 0 \leq p_j \leq 1$$

L'importanza relativa di ogni sottoinsieme viene calcolata sommando i pesi dei criteri che appartengono a quel sottoinsieme:

$$P^+(a, a') = \sum_{j \in J_+} p_j$$

$$P^=(a, a') = \sum_{j \in J_=} p_j$$

$$P^-(a, a') = \sum_{j \in J_-} p_j$$

Il test viene superato se sono soddisfatte le due seguenti condizioni:

$$\begin{cases} c(a, a') = \frac{P_+(a, a') + P_=(a, a')}{P} \geq c \\ \frac{P_+(a, a')}{P_-(a, a')} \geq 1 \end{cases}$$

Il termine $c(a, a')$ della prima condizione rappresenta un indice di concordanza, e va confrontato con il parametro c che da una misura della soglia di maggioranza; tale parametro rimane uguale per

tutte le coppie, ed è definito a priori dal decisore; generalmente vengono scelti valori di soglie dette “naturali”: si può adottare la soglia *forte*, con valore $c = 3/4$, e la soglia *debole*, con valore $c = 2/3$. La seconda condizione serve a verificare che i criteri per cui “ a è preferibile ad a' ” siano più importanti di quelli che esprimono “ a' è preferibile ad a ” [34].

Test di discordanza

Questo test si applica all'insieme $J_-(a, a')$ e si vuole verificare che non vi sia un veto al surclassamento di a' da parte di a : può infatti accadere infatti che a superi a' per un certo numero di criteri, ma vi siano altri criteri ritenuti importanti per i quali a sia peggio di a' ; su questi criteri si può porre una soglia di veto tale da impedire il surclassamento qualora a sia peggiore di a' in quel criterio, anche se ha superato il test di concordanza.

Si indichino con j^* i criteri sui quali il decisore pone un veto all'affermazione “ a surclassa a' ”; essi appartengono all'insieme $J^* \subseteq J$ ed individuano degli insiemi di discordanza costituiti da coppie di valori estremi che fanno scattare il veto [34]:

$$Dj^* = \{(e, e')\}, \quad \text{con } e \ll e'$$

Se anche per un solo criterio $j^* \in J_-(a, a')$ su cui è stato posto il veto risultano entrambe le condizioni:

$$g_{j^*}(a) = e$$

$$g_{j^*}(a') = e'$$

Allora si avrà $a - S a'$.

Se il confronto di ciascuna coppia supera entrambi i test allora si potrà dire valida la relazione di surclassamento.

Grafo di surclassamento

Il risultato della prima fase è rappresentato dal grafo di surclassamento: in esso le azioni sono rappresentate mediante nodi, collegati da archi orientati che indicano la direzione di surclassamento.

Si possono avere tre diverse situazioni [34]:

- $a \rightarrow a'$: a è preferibile ad a' ;
- $a \leftrightarrow a'$: a e a' si surclassano a vicenda, quindi sono indifferenti;
- $a - a'$: a e a' sono incomparabili.

Si procede poi alla seconda fase del metodo, che consiste nell'ordinare le scelte mediante una procedura di "preordine", che può avvenire sia dall'alto che dal basso: nel primo caso si comincia dall'insieme delle azioni non surclassate da nessun'altra azione e, tramite procedura iterativa che vede via via ridursi questo insieme, si ottiene una serie ordinata di classi di equivalenza sull'insieme A delle azioni che va dalla migliore alla peggiore; il preordine dal basso si costruisce allo stesso modo in maniera iterativa, questa volta però estraendo le azioni che non surclassano nessun'altra azione: in questo modo si ottiene una serie ordinata delle azioni dalla peggiore alla migliore. Non è detto che i due preordini siano uguali ma solamente capovolti: spesso, le situazioni di incomparabilità conducono a preordini differenti. Quando invece questi coincidono, allora saranno uguali al preordine finale $P(A)$.

Nell'effettuare il preordine è necessario stabilire prima due relazioni di surclassamento, che verranno poi considerate nei preordini: uno forte e uno debole, che differiscono solo per i valori della soglia di concordanza e nelle classi di discordanza (quello forte ha più veti) [34].

4.3. *Electre II: applicazione*

Nel presente lavoro si è effettuata l'analisi multicriteri con il metodo Electre II, i cui passaggi principali sono stati illustrati nel paragrafo precedente ma verranno qui ripresi nel dettaglio. Tale metodo non prevede l'utilizzo di veti, ma è comunque risultato ottimale per il caso studio in esame;

esso si basa su *criteri veri*, ovvero quelli in cui qualsiasi differenza di giudizio indica una preferenza in senso stretto [35]. Il tipo di surclassamento che viene fuori da questo metodo è definito, certo: la funzione caratteristica associata, $\delta(a, a')$, assume valore unitario per surclassamento certo e valore nullo per non surclassamento certo [35].

Per il caso in esame vengono definiti gli insiemi delle alternative (A) e l'insieme dei criteri (J); le alternative sono i tre mezzi considerati per effettuare il servizio e con i quali è stata svolta l'analisi.

Verranno indicati nel seguito come riportato:

Tabella 32: insieme delle alternative considerate in AMC

a_1	Veicolo di tipo tram - treno
a_2	Treno a idrogeno
a_3	Treno diesel Minuetto

La definizione dei criteri è un passaggio importante in quanto serve a chiarire quali sono gli elementi a cui dare priorità in modo poi da poter basare la scelta su di essi. Come già detto, i criteri possono essere ordinali o cardinali, espressi nella loro unità di misura o in una scala di valutazione; per effettuare un'analisi completa che includa al meglio i diversi aspetti di cui tener conto, sono stati scelti i seguenti criteri:

Tabella 33: descrizione dei criteri considerati in AMC

Criterio	Descrizione	Scala di misura
g_1	Consumi calcolati	$kWh/seat \cdot km$
g_2	Costo a veicolo	Milioni di €
g_3	Posti offerti	-
g_4	Prestazioni in accelerazione	m/s^2
g_5	Comfort	Scala da 1 a 10

Il primo criterio da considerare è sicuramente il consumo, dal momento che il fine dell'analisi è proprio quello di confrontare i consumi con i diversi mezzi; valore considerato è il valore medio dei consumi in entrambe le direzioni, in genere uguali. Come secondo criterio, che in alcuni casi può passare in secondo piano ma è comunque necessario ai fini della scelta, è il costo del singolo veicolo; è stato trovato in letteratura il costo relativo ad ogni mezzo: *4 milioni di €* per il tram - treno, *5 milioni di €* per il treno Minuetto e *11,4 milioni di €* per il treno a idrogeno.

Il totale dei posti offerti è stato riportato nelle analisi al capitolo, quest'ultimo è comprensivo dei posti a sedere e dei posti in piedi, definendo quindi la capienza del mezzo.

Per avere una misura delle migliori o peggiori prestazioni dei mezzi in relazione tra di loro è stato considerato il valore medio di accelerazione raggiunta. È chiaro che un più alto valore di accelerazione decreta una migliore prestazione, in quanto permette di coprire gli spazi in minor tempo, ma nel caso in esame i tempi di percorrenza rilevati con i tre mezzi risultano prossimi tra loro e si attestano sui *13 minuti*: infatti, le maggiori accelerazioni raggiungibili con il tram pesante vengono poi condizionate dal fatto che la velocità massima raggiungibile è di *70 km/h*, inferiore rispetto agli *80 km/h* raggiungibili con gli altri due mezzi. Inoltre, quest'ultima grandezza può in prima battuta essere relazionata anche al livello di comfort: la maggiore accelerazione raggiunta, con un mezzo di ridotte dimensioni e materiale più leggero rispetto a quello ferroviario, non sempre permette di raggiungere elevati livelli di comfort. In questo modo viene giustificato il valore più basso di comfort che verrà attribuito al tram – treno. Ma l'ultimo criterio non si basa solo su aspetti di questo genere, bensì vuole prendere in considerazione anche gli aspetti relativi alla tecnologia e alla modernità dei mezzi: il treno Minuetto, costruito a partire dal 2003, risulta quasi obsoleto rispetto ai due nuovi mezzi quali tram – treno e treno ad idrogeno, quest'ultimo ancora attualmente in costruzione quindi dotato di tecnologie all'avanguardia; inoltre, tra le peculiarità del treno a idrogeno vi è la sua silenziosità, che sicuramente verrà apprezzata dal passeggero, ma la stessa cosa non si può dire di un rotabile che circola ormai da quasi 20 anni, oppure di un rotabile più piccolo che circola su una linea ferroviaria.

L'analisi multicriteri serve a mettere a confronto tutti questi aspetti, diversi tra loro e difficili da comparare e che non si compensano a vicenda: non sempre si può rinunciare ad una caratteristica a favore di un'altra che la compensi appieno. Pertanto l'analisi si pone come metodo oggettivo per valutare e classificare le diverse alternative, che può essere dunque di supporto alla scelta finale.

Chiariti gli obiettivi e i criteri con i quali si effettua l'analisi, si riporta la matrice considerata:

Tabella 34: matrice utilizzata nella AMC con Electre II

	g_1	g_2	g_3	g_4	g_5
W	0,4	0,2	0,2	0,1	0,1
a_1	-0,73	-4	-290	0,66	7
a_2	-1,07	-11	-500	0,5	9
a_3	-1,01	-5	-306	0,44	6

La riga W è la matrice dei pesi che vengono attribuiti ai diversi criteri nell'analisi: non tutti i criteri hanno la stessa importanza nella valutazione finale; volendo concentrarsi in primo luogo sui consumi relativi ai tre mezzi, viene definita questa prima combinazione dei pesi, che rappresenta appunto un punto di vista, e attribuisce un peso preponderante al primo criterio. Gli altri criteri vengono considerati con pesi minori, ma è importante osservare come al criterio relativo ai posti offerti venga attribuito un valore di peso maggiore in confronto agli ultimi due: questo è dovuto al fatto che è necessario anche ben dimensionare un servizio di trasporto in relazione alla domanda che si dovrà poi servire; un sistema sovradimensionato porterà a sprechi di posti e di energia, che si traducono in un aumento dei costi di esercizio. Per questo motivo viene attribuito il segno negativo ai valori di questo criterio, proprio per indicare che, in questo determinato caso di linea a scarsa frequentazione, un mezzo con un minor numero di posti è da preferire ad un mezzo eccessivamente capiente.

Allo stesso modo viene attribuito segno negativo ai valori relativi al primo criterio: in questo caso vanno intese come migliori le alternative con il più basso valore di consumi, così come avviene per il secondo criterio, in cui sono da preferire le alternative con costo inferiore.

Una volta definita la matrice di decisione si procede con l'implementazione del metodo: in questo caso devono essere fissati sei parametri:

- tre livelli dell'indice di concordanza: c^- , c , c^+ , questi vengono fissati in modo che sia soddisfatta la relazione: $0,5 \leq c^- \leq c \leq c^+ \leq 1$; questi indici servono per definire le relazioni di surclassamento forte e debole. Vengono scelte le soglie dette naturali come valori estremi, quella forte e quella debole, e con valore di c compreso tra i due;
- due livelli dell'indice di discordanza: d^- e d^+ , questi devono essere scelti in modo da soddisfare la relazione: $0 \leq d^- \leq d^+ \leq 1$;
- il massimo numero di cicli che verranno rimossi: un ciclo è un percorso formato da archi orientati tutti nella stessa direzione e il cui nodo iniziale coincide con il nodo finale [35]; essi tendono a invalidare la soluzione ottenuta con Electre II.

I parametri che vengono scelti sono i seguenti:

<input type="radio"/> Electre I	d:	0	c:	0	
<input type="radio"/> Electre I_s	L:	0,5			Cycles: 30
<input type="radio"/> Electre I_v	d:	0	c:	0	
<input checked="" type="radio"/> Electre II	c-:	0,66	c:	0,7	c+: 0,75
	d-:	0,25	d+:	0,5	Cycles: 30
<input type="radio"/> Electre III					
<input type="radio"/> Electre IV					
<input type="radio"/> Electre TRI	Classes:	2			Lambda: 0,5
<input type="radio"/> Electre TRI ME	Classes:	2	Evaluators:	2	Lambda: 0,5

Figura 33: parametri utilizzati in Electre II

Una volta definito il numero di alternative e di criteri da considerare si importa nel software la matrice di decisione:

Electre I d: c:
 Electre I_s L: Cycles:
 Electre I_v d: c:
 Electre II c-: c: c+: Cycles:
 d-: d+:
 Electre III
 Electre IV
 Electre TRI Classes: Lambda:
 Electre TRI ME Classes: Evaluators: Lambda:

Actions: Criteria: Matrix Solve Graph Save

Matrix	g1	g2	g3	g4	g5
W	0,4	0,2	0,2	0,1	0,1
a1	-0,73	-4	-290	0,66	7
a2	-1,07	-11	-500	0,5	9
a3	-1,01	-5	-306	0,44	6

Figura 34: valori di input in Electre II

Inseriti tutti i dati di input e facendo girare l'algoritmo, vengono forniti gli output: la matrice di concordanza, di discordanza, la matrice di credibilità, se vi è la presenza di cicli di surclassamento forte e di surclassamento debole, i valori relativi al preordine dall'alto, dal basso e il preordine finale e la matrice di dominanza:

A	B	C	D	E
## ELECTRE II ##				
Concordance Matrix:				
		a1	a2	a3
	a1	-	0.9	1.0
	a2	0.1	-	0.2
	a3	0.0	0.8	-
Discordance Matrix:				
		a1	a2	a3
	a1	-	0.0095	0.0
	a2	1.0	-	0.9238
	a3	0.0762	0.0143	-
Credibility Matrix:				
		a1	a2	a3
	a1	-	Ss	Ss
	a2	0.0	-	0.0
	a3	0.0	Ss	-
Cycles Ss:				
	None			
Cycles Ws:				
	None			
Ranking:				
		Ascend.	Descend.	Average
	a1	1.0	1.0	1.0
	a2	3.0	3.0	3.0
	a3	2.0	2.0	2.0
Dominance Matrix:				
		a1	a2	a3
	a1	-	P+	P+
	a2	P-	-	P-
	a3	P-	P+	-

Figura 35: risultati ottenuti da Electre II

Si può da subito osservare come non siano presenti cicli di surclassamento forte e debole, non sono presenti relazioni di surclassamento debole (informazione letta dalla matrice di credibilità), e i preordini dall'alto e dal basso coincidono: essi dunque rappresenteranno il preordine finale. Le relazioni di surclassamento che sono state definite sono:

$$a_1 S a_2$$

$$a_1 S a_2$$

$$a_3 S a_2$$

La soluzione finale viene rappresentata anche per via grafica:

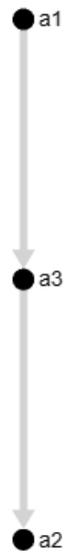


Figura 36: soluzione finale del metodo Electre II

L'ultima immagine fornisce la classificazione finale ottenuta dal metodo; dunque l'alternativa del tram – treno viene preferita alle altre due, e il treno diesel al treno ad idrogeno. Infatti, per questo tipo di problema, il treno ad idrogeno sovradimensiona di molto il servizio, pertanto si dovrebbe optare su un treno più piccolo, e quindi meno costoso, per poter scegliere questa soluzione innovativa. Un risultato di questo genere era già in certa misura prevedibile a causa del basso valore dei consumi della soluzione tram – treno, in confronto con quelli delle altre due alternative.

4.3.1 Analisi di sensitività

Ottenuto un primo ordinamento delle alternative, si può procedere con un'analisi di sensitività che permette di verificare se la soluzione originale ottenuta è stabile o meno; essa consiste nel ripetere il procedimento variando alcuni o tutti i valori dei pesi e degli attributi. Se la soluzione rimane la stessa, allora si può ritenere stabile [34]. Come già ricordato, una particolare combinazione di pesi costituisce un punto di vista: in merito alla stessa problematica si possono avere più punti di vista, a seconda che si decida di privilegiare un aspetto piuttosto che un altro. Il primo punto di vista considerato dunque è stato quello di ricercare l'alternativa più efficiente dal punto di vista dei

consumi; pertanto, in un'ottica di considerare i diversi aspetti più o meno importanti, si può variare la combinazione dei pesi.

In primo luogo può essere utile considerare una combinazione in cui a tutti i criteri viene data la stessa importanza, in modo da ottenere un giudizio complessivo sulla base di tutti gli aspetti considerati, pertanto a tutti e cinque i criteri si attribuisce un peso pari a 0,2:

The screenshot shows the configuration for the Electre II method. The 'Electre II' option is selected. The parameters are set as follows:

- Electre I: d: 0, c: 0
- Electre I_s: L: 0,5, Cycles: 30
- Electre I_v: d: 0, c: 0
- Electre II: c-: 0,66, c: 0,7, c+: 0,75, Cycles: 30, d-: 0,25, d+: 0,5
- Electre III: (unselected)
- Electre IV: (unselected)
- Electre TRI: Classes: 2, Lambda: 0,5
- Electre TRI ME: Classes: 2, Evaluators: 2, Lambda: 0,5

Below the configuration, the 'Actions' bar shows 3 actions and 5 criteria. The 'Matrix' button is highlighted. The resulting matrix is shown in the table below:

Matrix	g1	g2	g3	g4	g5
W	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
a1	-0,73	-4	-290	0,66	7
a2	-1,07	-11	-500	0,5	9
a3	-1,01	-5	-306	0,44	6

Figura 37: input di Electre II con la seconda combinazione dei pesi

Il risultato a cui si perviene è di seguito riportato:

## ELECTR...				
Concordanc...	a1	a2	a3	
a1	-	0.8	1.0	
a2	0.2	-	0.4	
a3	0.0	0.6	-	
Discordance...	a1	a2	a3	
a1	-	0.0095	0.0	
a2	1.0	-	0.9238	
a3	0.0762	0.0143	-	
Credibility M...	a1	a2	a3	
a1	-	Ss	Ss	
a2	0.0	-	0.0	
a3	0.0	0.0	-	
Cycles Ss:	None			
Cycles Ws:	None			
Ranking:	Ascend.	Descend.	Average	
a1	1.0	1.0	1.0	
a2	2.0	2.0	2.0	
a3	2.0	2.0	2.0	
Dominance ...	a1	a2	a3	
a1	-	P+	P+	
a2	P-	-	I	
a3	P-	I	-	

Figura 38: output di Electre II con la seconda combinazione dei pesi

Dai valori ottenuti si può osservare come venga confermato il surclassamento di a_1 nei confronti di a_2 e a_3 , ma questa volta si avrà la relazione:

$$a_3 - S a_2$$

Tra queste due alternative non sussiste nemmeno un surclassamento debole ($c_{32} = 0,6 < 0,66$), pertanto le due alternative sono *incomparabili*, ovvero le informazioni che si hanno non sono sufficienti ad esprimere la preferenza dell'una sull'altra. Vengono pertanto poste allo stesso livello, surclassate da a_1 :



Figura 39: soluzione grafica ottenuta con la seconda configurazione dei pesi

Si potrebbe poi considerare un punto di vista incentrato maggiormente sul fattore economico, e anche sul livello di comfort offerto dal rotabile: si attribuirà lo stesso peso al criterio che esprime i costi iniziali (relativi all'acquisto del veicolo) e al criterio che esprime i consumi, indicatore dei costi di esercizio; si attribuirà poi un peso inferiore al criterio che esprime il comfort, e un peso ancora più basso ai restanti due criteri:

Tabella 35: dati di input utilizzati per valutare uno scenario futuro

	g_1	g_2	g_3	g_4	g_5
W	0,4	0,1	0,3	0,1	0,1
a_1	-0,73	-4	290	0,66	7
a_2	-1,07	-11	500	0,5	9
a_3	-1,01	-5	306	0,44	6

La soluzione che si ottiene in questo caso è differente:

## ELECTRE II ##				
Concordance Matrix:				
		a1	a2	a3
	a1	-	0.6	0.7
	a2	0.4	-	0.5
	a3	0.3	0.5	-
Discordance Matrix:				
		a1	a2	a3
	a1	-	1.0	0.0762
	a2	0.0333	-	0.0286
	a3	0.0048	0.9238	-
Credibility Matrix:				
		a1	a2	a3
	a1	-	0.0	Ss
	a2	0.0	-	0.0
	a3	0.0	0.0	-
Cycles Ss:	None			
Cycles Ws:	None			
Ranking:				
		Ascend.	Descend.	Average
	a1	1.0	1.0	1.0
	a2	2.0	1.0	1.5
	a3	2.0	2.0	2.0
Dominance Matrix:				
		a1	a2	a3
	a1	-	P+	P+
	a2	P-	-	P+
	a3	P-	P-	-

Figura 41: output di Electre II riferiti allo scenario futuro

Si può osservare come in questo caso vi sia soltanto una relazione di surclassamento forte:

$$a_1 S a_3$$

Nel lungo termine infatti si ha una preferenza sicura del tram – treno sul treno diesel, ma non sul treno ad idrogeno, che risulta probabilmente più adatto alla potenziale domanda da servire.

I due preordini, dall'alto e dal basso, in questo caso non coincidono, pertanto il pre-ordine finale è ottenuto come media tra i due, come indicano i dati sopra illustrati:



Figura 42: preordine finale dello scenario futuro

Si può pertanto concludere che, in uno scenario futuro, la scelta del tram – treno risulta comunque più adeguata ma il treno ad idrogeno sarà da preferirsi al tradizionale treno diesel.

Va evidenziato che un metodo di valutazione non va inteso come un algoritmo che fornisca automaticamente la soluzione voluta, ma piuttosto esso può fornire un aiuto che permetta un'analisi sistematica delle alternative e che guidi il decisore verso la decisione finale.

4.4. Potenziale domanda da servire

Alla base della necessità di ripristino del servizio ferroviario vi è il problema della congestione: la strada Provinciale 662 è quella maggiormente utilizzata per il collegamento Saluzzo – Savigliano, anche dalla linea 97 di Bus Company per le corse degli autobus, (che è quella che ha sostituito il servizio ferroviario tra Saluzzo e Savigliano) e risulta infatti particolarmente congestionata. Il problema della congestione sta alla base di qualsiasi intervento di pianificazione dei trasporti; oltre

alla perdita di tempo e alla mancanza di comfort che crea nell'utente, la congestione ha anche altri impatti negativi, quali aumento degli inquinanti atmosferici, aumento del rumore etc. Grazie a 5T s.r.l.⁸, è stato possibile entrare in possesso dei dati riguardanti il numero di veicoli che transitano su tale sezione stradale. Vi sono infatti delle sonde dislocate in diversi punti di interesse della rete stradale che permettono di rilevarne il traffico. In particolare, la sonda di interesse è risultata la CN – 05, che si trova appunto sulla SP 662 in prossimità di Savigliano. I dati forniti riportano le seguenti informazioni:

- Data – giorno in esame;
- Nome postazione dei sensori;
- Flusso – indica se la direzione è ascendente o discendente;
- Provincia;
- Comune;
- Strada – indica il tipo di strada;
- Km – indica i chilometri della strada in cui è sita la postazione;
- Direzione – indica la zona (comune o altro) verso la quale è rivolto il senso di marcia;
- Totale mezzi rilevati nel giorno in esame;
- Totale mezzi pesanti rilevati nel giorno in esame;
- Latitudine della postazione;
- Longitudine della postazione.

Per il periodo di interesse è stato preso in esame novembre 2019, volendo riferirsi a una situazione generica di traffico in condizioni pre - Covid. L'andamento dei flussi totali giornalieri, comprensivi anche dei mezzi pesanti, è di seguito riportato:

⁸ Società che gestisce la centrale della mobilità e dell'informabilità dell'area metropolitana torinese e del Piemonte.

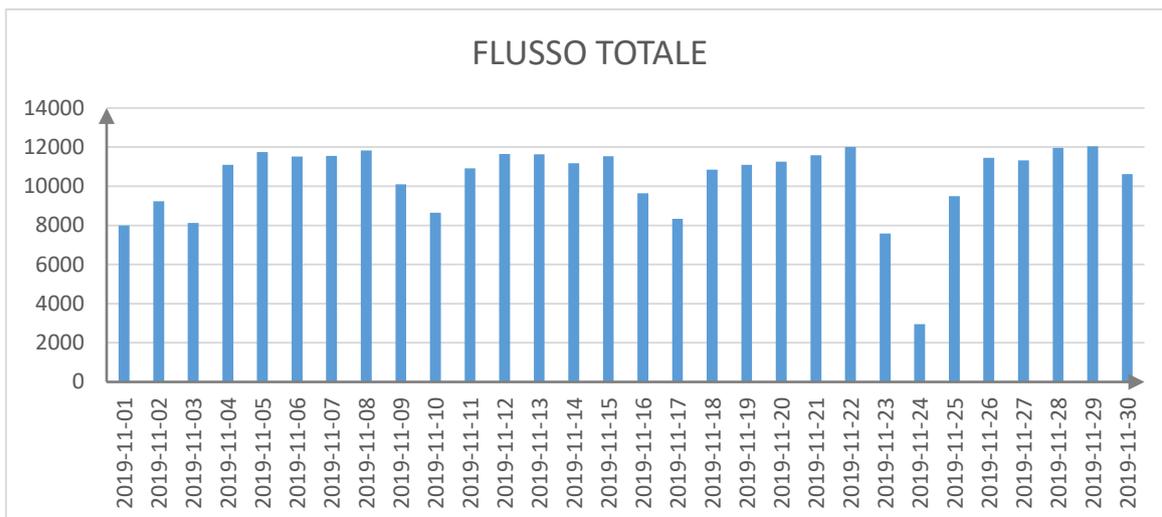


Figura 43: flusso giornaliero nel mese di novembre da Savigliano a Saluzzo e viceversa

L'arco temporale su cui si ha il dato in esame è il giorno pertanto, ipotizzando che il flusso si distribuisca equamente nelle due fasce orarie di punta che erano anche quelle servite dal treno, ovvero la fascia oraria mattutina (dalle ore 6:00 alle ore 9:00) e quella serale (dalle 16 alle 19), si è pensato di considerare una quota parte di questi spostamenti che vengono effettuati in auto come potenziale domanda per il nuovo servizio in treno: si assume infatti che, una volta ripristinato il servizio, verrà utilizzato maggiormente grazie alle migliori prestazioni che possiede. Considerando un coefficiente di occupazione delle auto pari a 1,2 si ottiene il numero di persone che compiono tale spostamento; un'aliquota di questi passeggeri, ad esempio il 20%, si assume che andrà ad utilizzare il nuovo servizio di treno:

Tabella 36: numero di passeggeri giornaliero del servizio ferroviario

Giorno	Numero di passeggeri Giornaliero (Savigliano-Saluzzo)	Numero di passeggeri giornaliero (Saluzzo-Savigliano)
2019-11-01	1433	1413
2019-11-02	1569	1526
2019-11-03	1456	1433
2019-11-04	1715	1659
2019-11-05	1788	1726

2019-11-06	1759	1705
2019-11-07	1764	1718
2019-11-08	1797	1760
2019-11-09	1672	1643
2019-11-10	1508	1507
2019-11-11	1698	1649
2019-11-12	1788	1739
2019-11-13	1778	1725
2019-11-14	1742	1635
2019-11-15	1771	1733
2019-11-16	1618	1591
2019-11-17	1481	1468
2019-11-18	1685	1634
2019-11-19	1722	1668
2019-11-20	1728	1704
2019-11-21	1777	1720
2019-11-22	1817	1775
2019-11-23	1431	1290
2019-11-24	927	726
2019-11-25	1544	1468
2019-11-26	1762	1726
2019-11-27	1757	1683
2019-11-28	1814	1781
2019-11-29	1825	1795
2019-11-30	1741	1690

Il numero di passeggeri giornalieri che utilizzano il servizio ferroviario è stato ottenuto sommando il dato di frequentazione medio giornaliero fornito da Trenitalia per il mese di novembre 2019 (481 passeggeri) al 20% sottratto al dato di frequentazione stradale.

Si ottiene un dato medio di frequentazione giornaliero pari a: 1662 *pax/giorno*.

Considerando le 16 corse svolte dal treno nel 2019 si ottiene un valore di circa 104 *pax/treno*, valore che riempirebbe completamente il tram – treno e per il 70% un treno dalla capienza del Minuetto (considerando i soli posti a sedere).

4.5. Sintesi dei risultati ottenuti

Per avere una valutazione più completa, in termini energetici e ambientali, oltre alle analisi svolte è opportuno riferirsi ad un altro valore che tenga conto dell'intero ciclo di energia, necessaria per effettuare lo spostamento. Spesso infatti vengono considerati solamente i consumi effettivi di energia del determinato mezzo utilizzato, tralasciando la componente di energia utilizzata per rendere disponibile il carburante o il vettore energetico considerato; a tale scopo si è soliti far riferimento all'indice *Well to wheel* (WTW, dal pozzo alla ruota), che rappresenta un indice energetico assoluto, utile per confrontare tra loro le diverse tecnologie propulsive e i diversi carburanti o vettori energetici [36]. Esso risulta dato dalla combinazione di due sotto indici più specifici: il primo è il *Well to tank* (WTT, dal pozzo al serbatoio), che si riferisce al costo energetico per rendere disponibile il carburante, a partire dalla fonte primaria, ovvero comprende i costi energetici di estrazione, trasformazione e trasporto; il secondo sotto indice da considerare è il *Tank to wheel* (TTW, dal serbatoio alla ruota), che indica la quantità di energia necessaria per muovere il mezzo per una certa distanza, legato quindi alla tipologia di carburante e alla tecnologia di propulsione. Il secondo sotto indice (TTW) rappresenta dunque il consumo specifico, pertanto può essere associato al valore di consumo ottenuto per i tre mezzi, in termini di $kWh/seat \cdot km$; è utile quindi considerare il WTT del gasolio e del vettore energetico idrogeno [36], che vengono di seguito riportati insieme ai valori di consumi ottenuti:

Tabella 37: consumi energetici a confronto

<i>Tram - treno</i>	<i>Treno diesel</i>	<i>Treno a idrogeno</i>
<i>kWh/seat · km</i>		
0,73	1,01	1,07
<i>WTT gasolio [MJ_t/MJ_f]</i>		<i>WTT idrogeno [MJ_t/MJ_f]</i>
1,16		4,58

Il WTT viene espresso in MJ_t/MJ_f , dove MJ_t è l'energia impiegata per rendere disponibile 1 MJ di carburante, mentre MJ_f è l'energia contenuta nel carburante presente nel serbatoio del veicolo [36].

Dalle analisi riportate risulta quindi evidente come il mezzo più conveniente risulti in ogni caso il tram – treno: i minori consumi sono da attribuirsi al materiale rotabile più leggero, così come il minor costo del veicolo che ne deriva; la produzione del gasolio risulta inoltre più efficiente rispetto a quella dell'idrogeno, che richiede più di 4 unità estratte per ottenerne una nel serbatoio, mentre per il gasolio, solo un barile ogni sei circa non viene utilizzato per lo scopo finale.

Questo è dovuto al fatto che la catena di produzione dell'idrogeno non è ancora del tutto consolidata, ma qualora esso diventi il carburante principale in ambito ferroviario, la sua produzione verrebbe fatta sicuramente in larga scala da tecnici professionisti, aumentandone così l'efficienza.

Pertanto si può concludere che il tram – treno risulti comunque la soluzione preferibile, anche se alimentato da trazione diesel; qualora vi siano invece forti problematiche locali in termini di inquinamento, la soluzione ad idrogeno è sicuramente da preferire, ancor di più a fronte di un aumento di domanda.

4.6. Conclusioni

Dopo aver portato a termine il seguente lavoro di tesi, è possibile trarre le conclusioni a cui si è pervenuti; in primo luogo però è necessario ricordare che il processo di pianificazione di un sistema di trasporto è un processo complicato che, al pari di qualsiasi altro bene, risente della legge del mercato: la migliore soluzione dovrà tenere conto dell'interazione tra la domanda e l'offerta, in modo da bilanciare l'una con l'altra. La domanda è rappresentata dal numero di persone che necessitano di spostarsi da un luogo ad un altro, l'offerta è invece il sistema di trasporto (comprensivo dell'infrastruttura necessaria) considerato. Un corretto dimensionamento della domanda permette di ottenere una corretta soluzione finale, che non sia sovradimensionata, portando quindi a sprechi, ma nemmeno sottodimensionata, in modo da non soddisfare le esigenze comuni e quindi non portare ad alcun beneficio. Tuttavia, la giusta stima della domanda è un processo complesso, che richiede

l'intervento anche da parte del pubblico per poter intervistare le persone che usufruiranno del servizio; esso è inoltre strettamente legato alle caratteristiche socio – economiche delle persone, alle loro abitudini, e ad altre informazioni che sembrerebbero andare oltre la sfera dei trasporti e che presentano comunque un carattere aleatorio, perché basate sulle risposte delle persone; per eseguire una corretta indagine non sempre si hanno le risorse necessarie, né tantomeno i tempi: spesso si chiede infatti di agire nell'immediato e di prediligere la soluzione più economica. Pertanto, per avere una più chiara soluzione di come utilizzare al meglio le linee secondarie, una cosa che potrebbe risultare utile è sicuramente svolgere un'indagine sulle persone che effettivamente vivono nelle aree interessate e che potrebbero risentire, direttamente o indirettamente, del nuovo intervento realizzato. Per questo motivo generalmente è preferibile effettuare un'analisi più mirata, volta ad esempio, come in questo caso, sulla stima dei consumi, in modo da avere una soluzione immediata reale ed oggettiva, almeno secondo questo punto di vista. Riferirsi ai consumi è un modo diretto per considerare anche quelli che saranno i costi: è chiaro infatti che un mezzo con consumi eccessivi non potrà mai avere una valutazione positiva.

Il treno è il mezzo che vince, dal punto di vista energetico, su tutti gli altri mezzi, specialmente su quelli su gomma, in quanto è chiamato a vincere resistenze molto più basse, e permette di spostare un maggior numero di persone a parità di energia spesa con, ad esempio, un autobus; questo, chiaramente, purché viaggi a pieno carico. Proprio per questi motivi oggi si parla di “ritorno al ferro”, purché questo avvenga di pari passo con un altro degli obiettivi oggi comuni: eliminare la trazione diesel sulle tratte non elettrificate, per i motivi già noti di inquinamento e surriscaldamento globale. Come già ricordato, l'Italia presenta ancora una fitta rete di linee non elettrificate, talvolta difficili da elettrificare a causa delle difficoltà imposte dal tracciato; pertanto, sebbene il tram – treno costituisca la migliore soluzione nell'immediato in quanto permette di avere consumi molto bassi e il materiale rotabile è meno oneroso rispetto a quello di un treno tradizionale, questa soluzione utilizza ancora il diesel per la tratta non elettrificata, pertanto la soluzione ottimale sarebbe comunque quella di elettrificare la linea permettendo di utilizzare così un mezzo politensione. Inoltre, l'utilizzo del tram – treno sarebbe del tutto giustificato se si riuscisse a costruire l'infrastruttura tranviaria,

intervento che comunque può essere fatto in una fase successiva, dopo aver testato la validità del mezzo; tuttavia, è difficile riscontrare un aumento di domanda solamente cambiando il mezzo di trasporto: questa infatti registra significativi incrementi a seguito di un aumento delle fermate, ad esempio, e di un servizio più capillare del territorio, cosa che potrebbe soddisfare appieno il tram – treno. Spesso infatti si tende a sottostimare il tempo di percorrenza in auto e si tende a sovrastimare il tempo di percorrenza con i mezzi pubblici, ma l'utilizzo di un mezzo come il tram – treno, che senza rotture di carico riuscirebbe ad arrivare sia nel centro delle città che in periferia, porterebbe effettivamente ad un risparmio di tempo con conseguente aumento di domanda, così come dimostrano ampiamente i casi tedeschi.

L'ultima analisi dimostra che effettivamente sarebbe possibile avere un aumento di domanda, in termini di numero di passeggeri, perseguendo tra l'altro un duplice obiettivo: togliere traffico alla strada e far viaggiare il treno con carico sufficiente; un'agevolazione in tal senso richiede un intervento politico, che potrebbe essere quello di imporre delle limitazioni orarie sull'utilizzo di determinate strade, o quello di non far circolare le auto al di sotto di una classe di emissione. Spesso accade infatti che si decida di sopprimere i servizi su determinate linee in quanto i servizi regionali, che devono coprire almeno il 35% dei costi con i proventi da traffico (la restante parte viene coperta dalle Regioni), non riescono a raggiungere questo obiettivo proprio perché le linee sono poco frequentate.

Il treno a idrogeno nasce proprio per soddisfare i servizi sulle linee non elettrificate, pertanto rimane comunque una buona soluzione da considerare nel lungo termine, specie se la linea non può essere elettrificata; inoltre, dal punto di vista delle emissioni, il treno ad idrogeno non è paragonabile con le altre due alternative perché presenta emissioni pari a zero: l'unico elemento di scarto è vapore acqueo. Pertanto, seppure l'investimento iniziale risulti considerevole, una soluzione di questo genere permetterebbe di raggiungere gli obiettivi fissati dall'Europa in termini di emissioni. Si è potuto osservare come un tale mezzo riesca a raggiungere prestazioni migliori di un treno tradizionale, traducibili in minori tempi di percorrenza, per cui anche una soluzione del genere potrebbe portare ad un aumento della domanda

Bibliografia

- [1] B. Dalla Chiara, *Slide del corso "Sistemi di trasporto ferroviari, metropolitani e a fune"*, Torino, 2020.
- [2] A. Giuntini, «La nascita del sistema ferroviario e il ruolo della tecnica,» in *Enciclopedia Treccani*, 2013.
- [3] «Ferrovia Napoli-Portici,» [Online]. Available: https://it.wikipedia.org/wiki/Ferrovia_Napoli-Portici. [Consultato il giorno Ottobre 2021].
- [4] «La rete oggi,» [Online]. Available: <https://www.rfi.it/>. [Consultato il giorno Settembre 2021].
- [5] F. Carlucci e A. Cirà, *Economia e politica dei sistemi di trasporto*, 2008.
- [6] «Li chiamano rami secchi,» [Online]. Available: <http://www.ilmondodeitreni.it/ramiseccchi.html>. [Consultato il giorno Settembre 2021].
- [7] «Ferrovia Airasca - Moretta - Saluzzo,» [Online]. Available: https://www.ferrovieabbandonate.it/linea_dismessa.php?id=2. [Consultato il giorno Settembre 2021].
- [8] G. Tiberi, «Gli investimenti ferroviari: 150 anni di altalena,» *CIFI Roma*, 1989.
- [9] G. Stagni, «La Regione Piemonte chiude il 24% della propria rete ferroviaria. Cronaca di uno scempio,» 2012. [Online]. Available: <http://www.stagniweb.it/>. [Consultato il giorno Maggio 2021].
- [10] «L'Italia è seconda in Europa per possesso di automobili dopo il Lussemburgo,» [Online]. Available: <https://www.massa-critica.it>. [Consultato il giorno Ottobre 2021].

- [11] «Tasso di motorizzazione,» [Online]. Available: <http://www.arpa.piemonte.it>. [Consultato il giorno Ottobre 2021].
- [12] T. J. Nechyba e R. P. Walsh, «Urban sprawl,» *Journal of Economic Perspectives*, 2004.
- [13] L. Rizzetto, «Sicurezza e compatibilità geometrica della via dei tram-treno in ferrovia,» *Ingegneria Ferroviaria*, 2009.
- [14] A. Spinosa, Progetto Tram - treno: dall'infrastruttura al progetto urbano, Roma, 2010, p. Vol. 1.
- [15] R. Cambursano, Un mondo di Tram - storia e tecnica, Torino, 2017.
- [16] C. Pyrgidis, D. Tsipi, A. Dolianitis e M. Barbagli, «Una panoramica su metropolitane, tram e monorotaie entrati in esercizio e in costruzione in tutto il mondo alla fine del 2019,» *Ingegneria Ferroviaria*, n. 2, 2021.
- [17] «Tram-treno, caratteristiche, pregi e costi,» [Online]. Available: <http://www.stagniweb.it/tramtren.htm>. [Consultato il giorno Ottobre 2021].
- [18] «Sustainable mobility - The European Green Deal,» [Online]. Available: <https://ec.europa.eu>. [Consultato il giorno Novembre 2021].
- [19] «Decarbonizzazione,» [Online]. Available: <https://it.wikipedia.org/wiki/Decarbonizzazione>. [Consultato il giorno Novembre 2021].
- [20] «COP 21 - L'Accordo di Parigi,» [Online]. Available: <https://www.mite.gov.it/pagina/cop-21-laccordo-di-parigi>. [Consultato il giorno Novembre 2021].
- [21] «Green Deal europeo,» [Online]. Available: https://it.wikipedia.org/wiki/Green_Deal_europeo. [Consultato il giorno Novembre 2021].

- [22] «Hydrogen Roadmap Europe: a sustainable pathway for the European Energy transition,» [Online]. Available: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/fs_19_6726. [Consultato il giorno Novembre 2021].
- [23] «Premio al Coradia iLint, il primo treno a idrogeno del mondo,» [Online]. Available: <https://www.alstom.com>. [Consultato il giorno Novembre 2021].
- [24] «Hydrogen Coradia Stream,» [Online]. Available: <https://www.alstom.com>. [Consultato il giorno Novembre 2021].
- [25] «Cella a combustibile,» [Online]. Available: <https://www.treccani.it>. [Consultato il giorno Ottobre 2021].
- [26] «Arriva il Minuetto!,» [Online]. Available: <https://www.ferrovie.it>. [Consultato il giorno Ottobre 2021].
- [27] Alstom, *Dati forniti da Alstom*, Novembre 2019.
- [28] V. Torrieri, *Tecnica ed economia dei trasporti*, Edizioni scientifiche italiane, 2007.
- [29] M. Bassani, *Dispense del corso "Infratture viarie"*, Torino, 2019.
- [30] M. Diana, *Dispense del corso "Tecnica ed economia dei trasporti"*, Torino, 2019.
- [31] G. Vicuna, *Organizzazione e tecnica ferroviaria*, 1993.
- [32] B. Dalla Chiara, *Dispensa "Sistemi metropolitani ed innovativi"*, Torino, 2020.
- [33] M. Diana, *Dispense del corso "Transport planning"*, Torino, 2020.

- [34] B. Dalla Chiara, *I metodi di analisi multicriteri per i trasporti e la logistica*, Politecnico di Torino, 2000.
- [35] M. F. Norese, *Introduzione ai metodi multicriteri di surclassamento*, Politecnico di Torino, 2002.
- [36] B. Dalla Chiara, R. Ricagno e M. Santarelli, «Sostenibilità energetica dei trasporti: analisi dei consumi e della soluzione ferroviaria,» *Ingegneria Ferroviaria*, n. 6, pp. 531-543, Giugno 2018.