



Analisi della velocità di un elettrotreno merci a potenza distribuita su linee ad alta velocità

Assessing the speed of an electric multiple-unit freight train on high-speed lines

Simona GURRI^(***)
 Massimo BOCCHIERI^(*)
 Daniele GALASSO^(*)
 Valerio OPERTI^(**)
 Bruno DALLA CHIARA^(*)

(<https://www.medra.org/servlet/view?lang=it&doi=10.57597/IF.05.2023.ART.1>)

Sommario - Lo scopo di questo lavoro è stabilire la velocità a regime più appropriata per un elettrotreno merci (F-EMU), vale a dire un treno merci di nuova generazione a potenza distribuita, diagnosticabile ed utilizzabile in esercizio anche sulle linee ad alta velocità. Sono stati simulati diversi scenari sulla linea Torino-Verona, in modo tale da ottenere un servizio costituito da cinque F-EMU in successione, in partenza dopo la fine del servizio passeggeri ed in arrivo prima delle operazioni di manutenzione programmata sull'infrastruttura (IPO). Gli scenari simulati considerano sia il sistema di segnalamento attuale (SCMT e ERTMS livello 2) sia l'ETCS livello 3 con *train-platooning*. Si dimostra che la velocità di omologazione ottima per questi treni sia di 160 km/h, ovvero un buon compromesso tra la capacità della linea, l'efficienza del servizio e la resistenza garantita dei teloni delle casse mobili, nel caso di casse telonate o centinate. Inoltre, data la natura omotachica degli scenari previsti, la formazione di plotoni di treni potrebbe essere una soluzione per evitare i ritardi ed avere un servizio più affidabile e robusto.

1. Nuovi treni merci per una logistica rinnovata

La società attuale ha incentrato la logistica sul trasporto stradale [1], lasciando alla ferrovia per lo più merci a

Summary - This paper aims at establishing the most appropriate maximum cruising speed for a freight electric multiple unit (F-EMU), i.e., a concept of a new-generation freight train with distributed power, diagnosable and suitable to run also on high-speed lines. Different scenarios were simulated on the Turin-Verona (I) line, trying to achieve a service with five subsequent F-EMUs departing after the end of the passenger service and arriving before the scheduled night-time maintenance operations on the infrastructure. The scenarios considered the current signalling systems (SCMT and ERTMS level 2) and ETCS level 3 with *train-platooning*. It has been shown that, because of the limitations due to the tarpaulin guaranteed resistance of swap bodies loaded on the flat wagons, the most convenient speed for the design of these trains is 160 km/h, being the best compromise for line capacity and the efficiency of the service. Moreover, given the homotachic nature of the foreseen scenarios, train-platooning would be a viable solution for avoiding delays and pursuing a more reliable service.

1. Introduction: new freight trains for renewed logistics

Our society has hinged its logistics on road transport [1], leaving mainly low-specific-value materials to rail [2].

^(*) Politecnico di Torino, Dipartimento DIATI – Trasporti, Corso Duca degli Abruzzi, 24, 10129 Torino.

^{(**) RFI, Rete Ferroviaria Italiana, Via Paolo Sacchi, 1, 10125, Torino.}

^(***) Politecnico di Torino, Dipartimento DIATI – Trasporti, Corso Duca degli Abruzzi, 24, 10129 Torino. Autore corrispondente: simona.gurri@polito.it.

^(*) Politecnico di Torino, Dept. DIATI – Transport Systems, Corso Duca degli Abruzzi, 24, 10129 Torino, Italy.

^(**) RFI, Italian Railway Network, Via Paolo Sacchi, 1, 10125, Torino, Italy.

^(***) Politecnico di Torino, Dept. DIATI – Transport Systems, Corso Duca degli Abruzzi, 24, 10129 Torino, Italy. Corresponding author: simona.gurri@polito.it.

basso valore specifico [2]. Questo avviene un po' ovunque nel mondo [3], ma in particolare in Europa, dove molte aziende hanno preferito stabilirsi nelle vicinanze di svincoli autostradali, in modo da poter sfruttare appieno la convenienza e la flessibilità del trasporto stradale, che, al contrario della ferrovia, non necessita di trasbordo della merce (a meno di raccordi ferroviari diretti nello stabilimento) per il primo e l'ultimo miglio e che può partire – dunque arrivare – grossomodo quando necessario, in linea con le filosofie del JIT e dell'industria 4.0.

Se gli investimenti e la ricerca nel trasporto stradale pesante hanno visto un progresso costante, il trasporto ferroviario delle merci è rimasto sovente indietro di decenni, specialmente in termini di proposte innovative e attrattive nei confronti della domanda. È noto, infatti, che le strutture dei treni merci non sono cambiate negli ultimi decenni, riproponendo come prassi la locomotiva che traina i carri tramite ganci e respingenti. Inoltre, in alcune zone d'Europa, si utilizzano ancora i carri merci chiusi e convenzionali che, utili per il trasporto diffuso di beni, sono inefficienti sia in termini di carico e scarico, sia per quanto riguarda la composizione del treno; questo approccio richiede infrastrutture dedicate per lo smistamento (le selle di lancio), che stanno via via scomparendo nei nodi ferroviari, lasciando spazio a terminal equipaggiati con gru a portale per la movimentazione delle unità di trasporto intermodali o UTI (si veda come riferimento il caso di Torino Orbassano [4]). La parte prevalente degli investimenti nel mondo ferroviario è infatti in capo all'infrastruttura che, adeguandosi, abbassa le impedenze nelle spedizioni ed attrae domanda [5]: è tuttavia necessario ripensare anche i veicoli per adattarsi al mercato.

Il trasporto stradale, invece, ha subito profondi cambiamenti e miglioramenti; ma nonostante le varie politiche per la restrizione delle emissioni inquinanti, è ancora lontano dall'essere un mezzo di trasporto sostenibile dal punto di vista energetico-ambientale, sociale ed economico: fonti varie relative al trasporto ferroviario riportano valori che oscillano tra 150 e 190 kJ/tonnellata e per km. In base a valori in letteratura [6] e effettuando opportune conversioni emerge un range indicativo tra 0.04 e 0.05 kWh/t-km. Di fatto la ferrovia cadrebbe in un intervallo tra 0.03 e 0.1, con una prevalenza tra 0.04 e 0.05 kWh/t-km, in funzione di numerosi fattori. Nel caso del trasporto merci pesante su strada, dai dati emerge che i consumi variano da circa 15 l/100 km quando la massa complessiva è di circa 5 t a valori che superano i 50 l/100km con massa complessiva superiore alle 30 t. Ovviamente la variabilità include molti fattori e si possono osservare anche casi di trasporto con massa di 40 t e consumo medio di 30 l/100km. Il gasolio si aggira attorno a 10.3 kWh/l – ovvero 8.5 kWh termici effettivi – quindi i consumi del trasporto merci stradale variano tra 0.08 per mezzi pesanti su lunghe percorrenze (senza particolari condizioni di traffico) e 0.3 kWh/t-km, quindi tra circa 2.6 e 10 volte superiore al trasporto merci ferroviario, con una prevalenza attorno a 4-5 volte teoriche, che divengono 5-6 volte effettive, fino a circa 12.

This occurs almost everywhere across the World [3], but particularly in Europe, where many firms have preferred to settle near highway junctions, to easily take advantage of the convenience and flexibility of road transport: this last, unlike rail, does not need handling or transshipments for changing transport mode (unless dealing with a direct rail conjunction) for the first and last miles, and can leave – and thus arrive – whenever necessary, coping well with the philosophies of JIT and the industry 4.0.

Moreover, while investments and research in heavy haulage by road have been steadily moving forward, freight transport by rail has oftentimes lagged decades behind, especially in terms of designing innovative and appealing solutions suitable to attract the demand. In fact, the freight train structure has not changed in the last decades, having in practice a locomotive which drags, via hooks and buffers, flat cars. In Europe, not infrequently boxcars are still used, which are useful for the diffused transport of goods, but inefficient in terms of loading and unloading times; this approach requires dedicated infrastructures for train composition (launching saddles or summit in gravity yard), which now tend to disappear from rail terminals in favour of gantry cranes for handling intermodal transport units or ITU (as a reference it is possible to cite the case of Torino Orbassano [4]). The bulk of investment in the rail world is actually borne by the infrastructure, which lowers travel impedances for shipments and attracts demand [5], but nevertheless also rolling stock needs to be reimagined to adapt to the market.

Road transport, on the other hand, has undergone many changes and improvements; however, despite policies to restrict pollutant emissions, it is still far from being a sustainable means of transportation in all contexts: sustainability here should not only be intended from an energetic and environmental point of view only, but also from the social and economic ones. Various sources related to energy consumption in rail transport [6] indicate values ranging from 150 to 190 kJ/ton and per km. Based on values in the literature and making appropriate conversions, an indicative range of 0.04 to 0.05 kWh/t-km emerges. In fact, rail would fall in a range between 0.03 and 0.1, with a predominance between 0.04 and 0.05 kWh/t-km, depending on numerous factors. In the case of heavy freight transport by road, the data show that consumption varies from about 15 l/100 km when the total mass is about 5 t to values that exceed 50 l/100 km with a total mass of more than 30 t. Obviously, the variability includes many factors, and cases of transport with a mass of 40 t and average consumption of 30 l/100 km can also be observed. Diesel fuel is around 10.3 kWh/l – in truth 8.5 effective thermal kWh – so road freight consumption varies between 0.08 for heavy trucks over long distances (without special traffic conditions) and 0.3 kWh/t-km, so between about 2.6 and 10 times higher than rail freight, mostly around 4-5 times in theory, which becomes 5-6 times in practice, up to about 12.

Currently, in fact, thanks to the sustainability policies enacted by the European Union, starting with the Transport

Attualmente, grazie alle policy europee sulla sostenibilità, a partire dal Libro bianco dei Trasporti del 2011 [7] e proseguendo con il *Green Deal* del 2020 [8], sta sorgendo sempre di più la necessità di soluzioni ferroviarie per il trasporto delle merci nelle medio-lunghe distanze. Si prevede infatti di raggiungere il 30% di quota modale nei prossimi 7 anni, e di raggiungere il 50% nel 2050, partendo da una quota attuale europea di circa il 17%. La soluzione proposta ad oggi consiste nell'esercizio di treni lunghi e pesanti, richiamando pratiche in uso in Nord America e nell'estremo Oriente [9], senza l'ambizione di raggiungere quelle dimensioni: treni fino a 2500 tonnellate e 740 m di lunghezza circolano da pochi anni su alcune linee ferroviarie europee. È davvero questa la soluzione per stimolare e far crescere il trasporto ferroviario delle merci in Europa, considerando anche le previsioni di una domanda sempre crescente [10]?

Questo articolo vuole supportare una visione alternativa, simulando l'esercizio di un elettrotreno merci (F-EMU) di nuova generazione [11], capace di sfruttare anche le linee ad alta velocità, che nella gran parte d'Europa sono costruite per un uso promiscuo ed eterotachico dell'infrastruttura. Il convoglio F-EMU deve quindi risultare multi-corrente e multi-tensione in modo da poter circolare sulle linee AV (25kV CA) e su quelle convenzionali (3kV CC o altre) che connettono terminali e scali merci con la rete Core, riuscendo al contempo a risolvere i problemi in cui s'incontra durante l'esercizio dei treni lunghi e pesanti [12].

Tra questi problemi si evidenziano:

- la possibile perdita di aderenza nella ripartenza da fermo su linee acclivi;
- i tempi lunghi nella trasmissione del segnale di frenatura puramente pneumatico, al quale va aggiunta la grande inerzia del treno, imponendo così manovre di frenatura specifiche soprattutto in discesa (ad esempio la frenatura a dente di sega) per evitare surriscaldamenti delle ruote e delle rotaie;
- il sovraccarico del primo gancio di traino dopo la locomotiva, con rischio di rottura.

Queste tre problematiche, non risolvibili se non con varie cautele su treni lunghi e pesanti a causa della struttura del treno stesso, possono essere invece tutti superati dalla configurazione a motori distribuiti del F-EMU. Esso, infatti, è composto da unità modulari a composizione fissa da tre carri a pianale per il trasporto di ogni tipo di UTI, ciascuna con un carrello motore in testa e in coda, portando la percentuale di massa aderente al 33% e alleviando gli sforzi longitudinali che sono invece equilibrati dalla presenza dei motori distribuiti. Al fine di bypassare il problema vigente della flessibilità di questo tipo di soluzione (che può essere affrontato in ricerche future tramite la realizzazione di ganci automatici tipo Shaku isolabili che garantiscano anche il passaggio di alta tensione una volta connessi), per la realizzazione di questo lavoro si considera un treno *shuttle* a composizione bloccata avente pertanto rodiggio modulare Bo'2'2'2'2'Bo'.

White Paper of 2011 [7] and carried forward in the Green Deal of 2020 [8], the need arises for rail solutions suitable to ensure a modal share of medium-to-long distance freight of 30% over the next 7 years and 50% by 2050, starting from a current European share of around 17%. The solution proposed to date consists of long and heavy trains, echoing practices in use in North America and the Far East [9], but without the ambition to reach those sizes: trains up to 2500 t and 740 m long have been in circulation already for a few years on certain European railway lines. However, is this the solution to boost rail haulage in Europe, considering the ever-increasing [10] demand forecast?

This paper aims to support an alternative vision, by simulating the operation of next-generation electric freight trains (F-EMUs) [11] capable also of taking advantage of the high-speed rail network, which allows for promiscuous and heterotachic use of the infrastructure in most of Europe. The F-EMU, hence, requires a multi-current and multi-voltage collection system to be able to run on both the HS lines (25 kV AC) and the conventional ones (3kV DC or others) connecting the freight terminals with the Core network, solving thereafter some issues that may occur during the operation of long and heavy trains [12].

Among these issues, the most notable are:

- possible adhesion loss in restarting uphill from a standstill;*
- the length of the purely pneumatic braking signal transmission, further aggravated by the train's great inertia, resulting in specific braking manoeuvres especially on downhill (e.g. sawtooth braking) to avoid overheating of the wheels and of the rails, too;*
- overloading of the first coupling hook after the locomotive, at risk of breakdown.*

In contrast, these three problems, which cannot be solved on conventionally-formed long (700-750 m) and heavy (1600-2500 t, namely 2200-2500 t) trains except with various cautions because of the structure of the train itself, are all overcome by the distributed motor configuration of the F-EMU. It, in fact, consists of modular units with a fixed composition of three flatbed cars for transporting all types of ITUs, each with a motor bogie at the head and tail, bringing the percentage of adhesive mass up to 33% and relieving the longitudinal stresses that are instead balanced by the presence of the distributed motors. In order to bypass the current problem of the flexibility of this type of solution (which can be addressed in future research through the realization of isolable Shaku-type automatic hooks that also guarantee high-voltage connection), for the completion of this work we consider a composition-blocked shuttle train having, therefore, Bo'2'2'2'2'Bo' modular wheelset.

The F-EMU convoy also naturally succeeds in providing for the functions of self-powered sensors that are being tested on conventional freight trains these days by presenting, already by design, an active load and vehicle monitoring system, directing it toward predictive maintenance

Il convoglio F-EMU, inoltre, riesce ovviamente a sop-
perire alle funzioni dei sensori autoalimentati che attual-
mente si stanno provando sui treni merci convenzionali,
presentando, già da progetto, un sistema di monitoraggio
attivo di carico e veicolo, indirizzandolo verso pratiche di
manutenzione predittiva che ne riducono i costi operativi
e ne aumentano l'affidabilità. Il monitoraggio e la diagno-
sticità in tempo reale sono requisiti essenziali per
viaggiare sulle linee AV secondo quanto stabilito da RFI e
la tracciabilità nonché la possibilità di condizionare termi-
camente il carico sono fonti di attrattività per il merca-
to. La diagnosticabilità del carico può garantire anche
una migliore ripartizione della potenza tra i diversi moto-
ri, che, avendo come informazione in ingresso la massa
del carico stesso su ogni carro, dal sistema di monitorag-
gio dei carrelli, possono essere automaticamente e singo-
lamente regolati.

Considerando i 283 km della linea AV Torino-Verona
come un caso studio, lo scopo è identificare la velocità più
adeguata di esercizio per questo nuovo tipo di materiale
rotabile, partendo dai requisiti funzionali, prescrittivi e di
esercizio. L'analisi viene svolta considerando due diversi
tipi di sistemi di segnalamento: quello attualmente previ-
sto sulle linee AV italiane, ovvero l'ERTMS livello 2, e una
condizione futura di segnalamento a blocco mobile con
l'implementazione dell'ERTMS livello 3 con la possibilità
di creare plotoni di treni o *train-platooning* [13].

Il materiale rotabile qui considerato devia quindi dal
concetto tradizionale di treno merci, composto da carri
semplici di livello tecnologico basilare (solo acciaio), in
favore di un prodotto innovativo, dunque adatto a soddi-
sfare la moderna domanda di trasporto. Si ritiene impor-
tante sottolineare quale sia la motivazione che spinge a
considerare un elettrotreno merci: a fronte di investimenti
iniziali indubbiamente più elevati, il convoglio F-EMU
può attingere ad una completa o almeno più ampia por-
zione di mercato, grazie all'introduzione delle innovazioni
suindicate e all'implementazione dei Corridoi Ferroviari
Merci RFC, che consentirebbero a questo treno di arrivare
alle quote modali previste con più facilità [14][15].

L'elettricità a bordo, che è ormai una necessità prima-
ria per gran parte di chi spedisce [16], consente anche di
ottenere una frenata più efficiente, rende possibile il mo-
nitoraggio della merce a bordo e del treno stesso, requisi-
to che RFI reputa fondamentale per poter viaggiare sulle
linee AV.

Una volta captata la corrente grazie ai pantografi sulle
unità di testa e di coda, la corrente viene raddrizzata e sta-
bilizzata in un convertitore AC/DC-DC. La corrente viene
distribuita sulla linea treno ad alta tensione ai DC link po-
sizionati lungo il treno, che collegano il rispettivo inverter
e il motore a valle di un pacco batteria usato per la rige-
nerazione, per i picchi di potenza e per l'ultimo miglio
(operazioni nei terminali). La corrente captata viene distri-
buita poi su altre dorsali lungo il treno a più bassa tensio-
ne, rispettivamente per la frenatura elettropneumatica, la
diagnosticabilità e l'alimentazione eventuale del carico.

*practices which would reduce its operational costs and in-
crease its reliability. Real-time monitoring and diagnosabil-
ity are essential requirements for travelling on HS lines as
determined by RFI (the National Railway Infrastructure
Manager), and traceability as well as the ability to thermally
condition cargo are sources of market attractiveness. Load
diagnosability can also ensure better power distribution
among the different motors, which, having the mass of the
load itself on each car as input information from the bogie
monitoring system, can be automatically and individually
adjusted.*

*Considering the 283 km-long Turin-Verona HS line as a
case study, the aim is to identify the most suitable maxi-
mum running speed of this new type of rolling stock starting
from functional, prescriptive, and operational requirements.
The analysis consists in considering two different signalling
conditions: the current one required for the Italian HS line,
i.e., ERTMS level 2, and a future condition of moving block
signalling with ERTMS level 3 implementation and the
possibility of train platooning [13].*

*The rolling stock considered, hence, deviates from the
conventional freight train concept, formed by simple and
cheap steel-only wagons, making them modern and inno-
vative, therefore suitable to meet present and future trans-
port needs. Indeed, it is important to emphasise the under-
lying root from which the support for the theory of the
freight train with the power distributed along the convoy
arises: at the expense of indubitably higher initial invest-
ment, this rolling stock can tap into the full, or at list wider,
choice of cargoes, thanks to the introduction of the set of
aforementioned technological innovations and the imple-
mentation of Rail Freight Corridors, thus allowing it to
catch road transport demand with ease [14][15].*

*Electricity on board, which is a primary need for most of
the costumers that need a forwarding or shipping service
[16], allows for more efficient braking, monitoring of the
goods and the train itself, which, as already mentioned, is a
requirement for RFI to run on high-speed lines.*

*Once the electricity is captured thanks to pantographs
on the head and tail units, it is rectified and then stabilized
in a DC-DC converter. The power is distributed throughout
the high-voltage train line to the DC links located along the
train. They in turn are the connections between the HV line,
the inverter and respective downstream electric motor, and
a battery pack used for regeneration, peak power, and last
mile (terminal operations). The collected electrical energy is
also distributed to other backbones along the lower-voltage
train for electro-pneumatic braking, diagnostics, and event-
ual load power supply, respectively.*

*Finally, it is important to emphasize the very possibility
of transporting temperature-controlled or refrigerated goods
in a seamless, intermodal transport context, in which road
and rail are not competitors, but they are rather integrated
together for more sustainable logistics.*

*Maximum operating speed is a key parameter in train
design, as it is needed to engineer the most appropriate*

Per ultimo si evidenzia proprio la possibilità di trasportare merce a temperatura controllata o refrigerata in un contesto di trasporto intermodale, senza soluzione di continuità, nel quale la strada e la ferrovia non sono alternative modali in competizione, ma si integrano insieme per una logistica più sostenibile.

La velocità massima di esercizio è un parametro fondamentale nella progettazione del treno, in quanto è necessaria per individuare i carrelli più adeguati a questo tipo di materiale rotabile. I carrelli merci convenzionali sono omologati fino al massimo 140 km/h e presentano dei passi molto corti, al contrario dei carrelli utilizzati dai treni passeggeri ad alta velocità. È necessario dunque individuare una velocità obiettivo per trovare il compromesso adeguato sul passo delle ruote e progettare un sistema di sospensioni che eviti un'usura elevata dell'infrastruttura ferroviaria AV.

Questo studio vuole quindi costituire un passo ulteriore rispetto a quello citato in precedenza [11] verso la progettazione fisica di questo treno, in cui la dinamica del treno stesso deve essere in grado di rispondere al compromesso tra la domanda di trasporto e l'attuabilità dell'esercizio ferroviario senza disturbi per il servizio passeggeri. Pertanto, si vogliono estrapolare i requisiti funzionali per la successiva progettazione fisica di carrelli e carri a pianale, nell'ottica di sfruttare, laddove possibile, le economie di scala su questi componenti.

Date le ragioni citate in precedenza, si procede con l'analisi dell'esercizio di un nuovo elettrotreno merci (F-EMU), concentrandosi sull'uso di tratte serali dopo la partenza dell'ultimo treno AV e prima dell'inizio dell'orario di manutenzione programmato dell'infrastruttura (IPO) [17] secondo l'orario in vigore a gennaio 2022. Benché si possa naturalmente ipotizzare un servizio misto passeggeri-merci, si è effettuata questa scelta al fine di sfruttare le ore di morbida ed evitare sia incroci e sia possibili ripercussioni sul servizio passeggeri a causa delle precedenze.

Il caso studio della linea ad alta velocità tra Torino e Verona (Fig. 1) è emblematico. La linea, ancora parzialmente in fase di costruzione nel Veneto, consente di ottenere una connessione veloce di vitale importanza per il nord Italia.

Nel prossimi paragrafi si esplicherà con maggior dettaglio quali siano le motivazioni che dovrebbero portare il trasporto merci ferroviario verso una piccola rivoluzione. Prima di tutto si fa riferimento alla letteratura sul calcolo della capacità ferroviaria e su come questa sia influenzata dal sistema di segnalamento presente in linea. In particolare, si riporta lo stato dell'arte del sistema ERTMS, sottolineandone i vantaggi e i problemi che ancora ostacolano l'implementazione del livello 3 sul lato pratico.

Nel terzo paragrafo viene discussa la metodologia utilizzata in questo lavoro per supportare l'approccio innovativo del convoglio F-EMU sul mondo del trasporto ferroviario. Sono state calcolate le performance del convoglio F-EMU a diverse velocità di regime tramite il software *OpenTrack* e con questo è stato possibile anche analizzare le possibili in-

bogies for this type of rolling stock. Conventional freight bogies are validated for up to a maximum of 140 km/h and have very short wheelbases, unlike the bogies used by high-speed passenger trains. Therefore, it is necessary to find a target speed to trade-off the appropriate wheelbase and design a suspension system that avoids high wear and tear on the HS rail infrastructure, while still making it possible to manoeuvre with short-radius turns in terminals.

Consequently, this study is intended to be a step further from the one mentioned earlier [11] towards the physical design of this train, in which the dynamics of the train itself must be able to meet the trade-off between transportation demand and the viability of rail operation without disturbance to passenger service. Therefore, we want to extrapolate the functional requirements for the subsequent physical design of bogies and flat cars, with a view to exploiting economies of scale on these components wherever possible.

Given the aforementioned reasons, therefore, hereafter the analysis of the operation of new freight electro-trains is performed, focusing on the use of evening tracks between the departure of the last high-speed passenger train and the start of night-time maintenance operations on the infrastructure (named IPO) [17] in accordance with the timetable in force in January 2022. Although a mixed passenger-freight service can be naturally envisioned, this choice was made in order to leverage soft hours and avoid both intersections and possible impacts on passenger service due to precedencies.

The case study of the high-speed rail line between Turin and Verona (Fig. 1), as explained below, is quite emblematic. The line is still partly under construction in Veneto region and it allows for the fast connection of two important freight villages located respectively in the West and East of Northern Italy.

In the next section, some of the motivations that should push rail freight towards a little revolution will be stressed. First, reference is made to the literature on railway capacity calculation and how it is affected by the signalling system. In this regard, the state of the art of ERTMS-II is analysed, highlighting its advantages and the shortcomings that still hinder the implementation of its third level.

*In Section 3, the methodology used in this work to support the innovative approach of this rolling stock to the world of rail freight transport will be discussed. Through the simulation software *OpenTrack*, the performances of the F-EMU at different cruising speeds are compared, analysing possible interferences with the timetable. After presenting the results in Section 4, in Section 5 an attempt will be made to highlight the revolutionary nature of the findings and the effect they could have on the way rail transportation is conceived. Not hiding the criticalities that this approach may have, the transport time achievable with this train will be compared with those of a conventional train and road transport, hence seeking a justification for the increased capital needed to purchase such a train.*



Figura 1 – Linea Torino-Verona al 22 novembre 2022. Fonte: sito web RFI. In verde la linea alta velocità-alta capacità, in arancione i nodi principali, in blu la linea tradizionale a 3kV CC e in giallo i terminali. I cerchi rossi indicano origine e destinazione del viaggio considerato.

Figure 1 – Torino/Turin-Verona line (IT) as it resulted on November 22nd, 2022. [Source: RFI website]. In green the High Speed – High Capacity line, in orange the main nodes, in blue the conventional 3 kV line and in yellow the freight terminals. The red circles show the origin and destination of the considered trip.

terferenze nell'orario programmato. Dopo aver presentato i risultati nel Paragrafo 4, nel Paragrafo 5 si cerca di far risaltare l'importanza dei risultati ottenuti e gli effetti che questi potrebbero avere su come i trasporti ferroviari sono concepiti. Senza nascondere le criticità di questo approccio, si compareranno i tempi di percorrenza di un convoglio F-EMU rispetto ad un treno merci convenzionale ed al trasporto stradale, cercando dunque di motivare l'incremento di capitale per l'acquisto di questo genere di treno.

I risultati di questo articolo dimostrano che è possibile ottenere vantaggi decisivi a favore del trasporto ferroviario nella scelta modale i capo alla logistica grazie finalmente all'uso delle linee ad alta velocità. È dunque possibile rilanciare il trasporto ferroviario delle merci progettando materiale rotabile innovativo, conveniente rispetto al trasporto stradale sia per l'ambiente ma anche per l'infrastruttura su cui esso viaggia.

Identifying the key characteristics of the F-EMU is pivotal, and this work clearly demonstrates that finally exploiting high-speed lines for freight trains can yield decisive advantages in favour of rail in logistics modal choice. Hence, it is possible to relaunch rail transport by designing innovative rolling stock that is convenient for both the environment – when compared to road transport – and for the infrastructure on which it runs.

2. Railway capacity and the ERTMS system: a state-of-the-art assessment

The problem of rail capacity is a complex one, and several researchers endeavour to define what parameters affect it and the methods for calculating it. According to the International Union of Railways (UIC) "capacity as such does

2. La capacità ferroviaria e il sistema ERTMS

Il problema della capacità ferroviaria è piuttosto complesso e nel tempo diversi ricercatori hanno provato a definire quali variabili la influenzino e i metodi per calcolarla. Secondo l'*Union International des Chemins de Fer* "la capacità in sé e per sé non esiste", ma essa dipende da come si sfrutta l'infrastruttura.

Tuttavia, durante gli anni, soprattutto mentre la domanda di traffico ferroviario aumentava fino a raggiungere in alcuni casi la saturazione della linea, sono state enunciate diverse definizioni.

Nel settore ferroviario, si distingue tra [18]:

- Capacità teorica: è il numero di treni che possono percorrere una tratta in un determinato intervallo di tempo e che viaggiano esattamente alla minima distanza temporale. Rappresenta la capacità massima che sarebbe possibile ottenere sulla linea; presuppone che il traffico sia omogeneo, omotachico e distribuito in modo uniforme nell'arco della giornata. Poiché si tratta di condizioni ideali, non è possibile far circolare effettivamente il numero di treni che si ottiene dal calcolo matematico.
- Capacità pratica o commerciale: rappresenta una misura più realistica, perché tiene conto di infrastruttura, traffico ed esercizio per massimizzare il volume di traffico rispetto a un orario stabilito. È la capacità che viene fornita in modo permanente in condizioni operative normali e si aggira intorno al 60-70% della capacità teorica (Fig. 2).
- Capacità utilizzata: è il volume di traffico effettivo nella rete; rappresenta il traffico esistente e le operazioni che si hanno nella linea. Di solito è inferiore alla capacità pratica.
- Capacità disponibile: è la differenza tra la capacità utilizzata e quella pratica.

Tra i parametri inclusi nel calcolo della capacità ferroviaria, i più comuni sono il numero di binari, la lunghezza del modulo dei binari, la definizione del percorso e i percorsi alternativi, gli effetti di rete e le condizioni dell'infrastruttura con i limiti di velocità ad essa associati.

Inoltre, nei servizi ferroviari, esiste un legame tra il sistema di segnalamento/posizionamento e la capacità, utile da richiamare ai fini di questo articolo. I sistemi esistenti in uso sulle reti ferroviarie si basano notoriamente sulla suddivisione dell'infrastruttura in "sezioni di blocco" fisse.

Nei sistemi a blocco fisso è possibile determinare l'occupazione di una sezione, non la posizione specifica del materiale rotabile in quella sezione. La posizione avrà un errore pari alla lunghezza dell'intera sezione di blocco, quindi la distanza minima tra due treni coincide esattamente con la lunghezza di una sezione di blocco.

La capacità ferroviaria aumenta con l'aumentare del numero di sezioni di blocco e, in particolare, è maggiore

not exist" and the capacity of infrastructure depends on how it is utilised.

However, over the years, especially as passenger traffic demand has increased and, in some contexts, has saturated the lines, different definitions of capacity have been proposed. In the rail sector, a distinction is made among the following ones [18]:

- Theoretical capacity, that is the number of trains that can travel on a route during a given time interval and travel perfectly at the minimum time spacing. This represents the maximum capacity that might occur on the line; it assumes that the traffic is homogeneous, homotachic, and evenly distributed throughout the day. Since these are ideal conditions, it is not possible to actually operate the number of trains that are obtained from the mathematical calculation.
- Practical or commercial capacity, which represents a more realistic measure, because it links infrastructure, traffic, and operations to maximise traffic volume with respect to a set time. It is the capacity that is permanently provided under normal operating conditions, and it is around 60-70% of the theoretical capacity (Fig. 2).
- Used capacity is the actual traffic volume that is configured in the network; it represents the existing traffic and the operations that you have in the line. It is usually less than the practical capacity.
- Available capacity is the difference between used and practical capacities.

Among the parameters included in the calculation of railway capacity, the most common are the current number of tracks, track length modulus, route definition and alternative routes, network effects, and infrastructure conditions with associated speed limits.

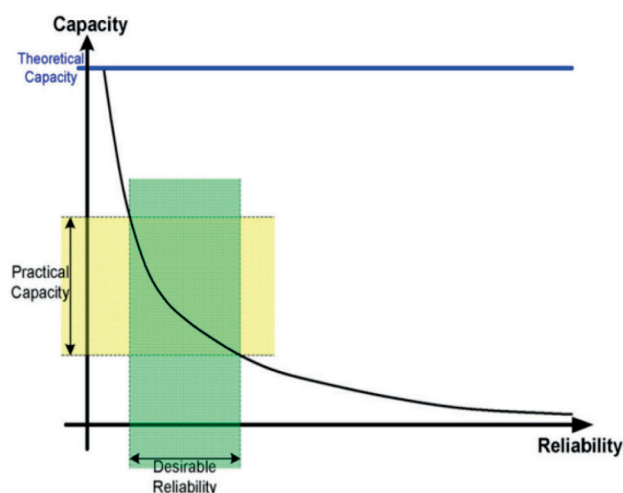


Figura 2 – Capacità vs Affidabilità [19].

Figure 2 – Capacity vs Reliability [19].

quando la lunghezza di queste sezioni è uguale alla distanza di arresto. È possibile portare a livelli massimi capacità delle linee ferroviarie ad alta velocità con le sezioni di blocco concatenate.

In un sistema di segnalazione di blocco mobile, invece, la posizione del treno è nota in modo continuo, consentendo una migliore regolazione delle precedenza ed un recupero dei ritardi, fattore ritenuto importante in questa analisi. In questo caso, la distanza tra due treni è variabile istante per istante ed è una funzione solo della distanza di frenata.

Altri parametri da considerare nel calcolo della capacità della linea sono il mix di traffico, la regolarità dell'orario, la classe di priorità di ciascun treno e l'influenza delle ore di punta, che riduce l'affidabilità dell'orario stesso.

I metodi di calcolo della capacità ferroviaria possono essere suddivisi in tre categorie:

- I metodi analitici, che richiedono meno dati, ma i cui risultati possono essere più un preliminare che una soluzione finale, in quanto essi, sebbene utili per identificare i colli di bottiglia, dipendono fortemente dai parametri di modellazione, come mostrato in [18]. Tra questi ci sono i metodi UIC, il primo pubblicato nel 1983 [20] e un secondo aggiornato nel 2013 [21], il metodo CUI English basato sulla compressione degli orari [22] e il RCET (*Railway Capacity Evaluation Tool*) di LAI e BARKAN [23][24]. Inoltre, per le reti complesse, è utile citare l'approccio di ROTOLI *et al.* 2016 [19].
- I metodi di ottimizzazione sono progettati per risolvere i problemi derivati dalla capacità ferroviaria, come quelli di programmazione, riprogrammazione e re-ins stradamento. Questi metodi sono più affidabili dei precedenti e spesso vengono usati in affiancamento ad essi. Questi includono il modello di MUSSONE e CALVO [25] e il metodo di LIAO *et al.* [26] che impiega un metodo euristico con rilassamento lagrangiano per massimizzare il numero di treni su un binario ferroviario.
- I metodi di simulazione forniscono una rappresentazione dinamica del servizio, che consente di considerare le variabili casuali tipiche delle operazioni ferroviarie. Se abbinati a metodi analitici, vengono definiti modelli ibridi. Questi includono, ad esempio, il metodo di DICEMBRE e RICCI [27] che sfrutta il software OpenTrack, il metodo di GOVERDE *et al.* [28] che utilizza la simulazione Monte Carlo, tre euristiche e un algoritmo *branch and bound* per sviluppare ulteriormente la UIC 406 e analizzare la capacità in presenza di disturbi del traffico.

Nel caso di linee a più binari, in conformità con il metodo [20], la capacità teorica viene calcolata come segue nell'equazione (1):

$$TC = \frac{N \cdot 1320}{D_n} \quad (1)$$

In addition, in rail services, there is a link between signalling/spacing system and capacity, which is useful to recall for the purpose of this paper. As well known, the existing systems in use on rail networks are based on partitioning the infrastructure into fixed block sections.

In fixed-block systems it is possible to determine the occupancy of a section, not the specific position of the rolling stock in that section. The position will have an error equal to the length of the entire block section, therefore the minimum spacing between two trains coincides with the length of the block section.

Railway capacity increases as the number of block sections increases, and, in particular, it is greatest when the length of these sections is equal to the stopping distance. It could be possible to bring the capacity of high-speed rail line to maximum levels with concatenated block sections.

In a moving block signalling system, on the other hand, the position of the train is continuously known, allowing better adjustment of the headways and a recovery of delays, a possibility deemed important in this analysis. In this case, the distance between two trains is variable instant by instant and it is a function of braking distance only.

Other parameters to consider when calculating line capacity include traffic mix, regularity of the train schedule, priority class of trains, and the rush hour factor, which reduces the reliability of the schedule.

The methods for calculating rail capacity can be divided into three categories, as follows:

- *Analytical methods, which require less data but whose results may be more of a preliminary than a final solution, as the results, although useful in identifying bottlenecks, are highly dependent on modelling parameters, as shown in [18]. The UIC methods are among them: the first one was published in 1983 [20] and a second one updated in 2013 [21], the CUI English method based on timetable squeezing [22] and the RCET (Railway Capacity Evaluation Tool) by LAI and BARKAN [23][24]. Additionally, for complex networks, it is useful to mention the approach by ROTOLI *et al.* 2016 [19].*
- *Optimisation methods are designed to solve problems derived from railway capacity such as those of scheduling, re-scheduling, and re-routing. These methods are more reliable than the previous ones and they can also be coupled with them. These include MUSSONE and CALVO's model [25] and the method by LIAO *et al.* [26] which employs a heuristic method with Lagrangian relaxation to maximize the number of trains on a railway track.*
- *Simulation methods provide a dynamic representation of the service, which allows for considering the random variables typical of rail-road operations. When coupled with analytical methods, they are referred to as hybrid models. These include, for example, the method of DICEMBRE and RICCI [27] which exploits OpenTrack software, the method of GOVERDE *et al.* [28] which uses Monte Carlo simulation, three heuristics as well as a*

Dove N è il numero di tracce, e D_n è la spaziatura temporale.

La capacità pratica, invece, è inferiore a quella teorica e dipende dal coefficiente di eterotachicità K , che è limitato tra 1,2 e 1,9:

$$CC = \frac{CTG}{K} \quad (2)$$

Dal lavoro di COVIELLO *et al.*, [29] in cui è stata presa in considerazione la linea tra Milano e Bologna, si può dedurre che sulle linee AV italiane c'è ancora della capacità residua non sfruttata, soprattutto nelle ore serali e mattutine. Inoltre, se venissero installati sui treni dei sensori per monitorare l'infrastruttura, sarebbe possibile ottimizzare gli slot di manutenzione e quindi allocare più tempo durante le ore notturne per i treni merci [30].

È proprio questo il contesto in cui si colloca il presente lavoro, poiché, come indicato, s'intende sfruttare la linea AV Torino-Verona dopo la partenza dell'ultimo treno passeggeri e prima delle operazioni di manutenzione programmate. Pertanto, un treno di nuova generazione potrebbe portare una manutenzione ottimizzata e una maggiore capacità alla linea oggetto di studio. La linea, ancora in costruzione nel 2023 per la sezione Brescia-Verona AV/AC, fa parte del corridoio mediterraneo della rete TEN-T [31][32], che, collegando i Paesi dell'Europa sud-occidentale a quelli orientali, si presenta come un percorso preferenziale sia per il traffico tra l'Europa e l'Asia, sia all'interno dell'Europa. Il progetto dovrebbe ridurre i tempi di percorrenza del 50% e fa parte del ramo AV/AC della linea Torino-Milano-Venezia, rappresentando un passaggio da ovest a est attraverso il nord Italia.

Essendo parte della rete TEN-T, la rete AV deve garantire i requisiti di interoperabilità [33] e, a questo proposito, l'ERTMS livello 2, l'ETCS baseline 3 release 2 [34] e il GSM-R baseline 1 sono in fase di implementazione sulla rete italiana, secondo le normative specifiche del settore [35] e della sicurezza ferroviaria [36]. L'impatto dell'implementazione dell'ERTMS è stato positivo, in quanto la tecnologia consente di realizzare sezioni di blocco più brevi, quindi ridurre i tempi di percorrenza [37].

Tuttavia, dalla letteratura emerge che quando si confrontano le curve di frenata con l'ETCS rispetto a quelle con un sistema convenzionale, le prime sono più conservative. Inoltre, l'infrastruttura tende ad avere grandi guadagni di capacità sia con un servizio omogeneo e sezioni di blocco lunghe, sia con un servizio eterogeneo e sezioni di blocco brevi, poiché in quest'ultimo caso è difficile che tutti i treni abbiano distanze di frenata paragonabili alla lunghezza della sezione di blocco [38].

In ogni caso, tuttavia, il modo per ottenere un sensibile miglioramento della capacità ferroviaria, soprattutto al fine di recuperare eventuali ritardi, sarebbe quello d'implementare il terzo livello dell'ERTMS [39], che prevede ancora il blocco radio, ma di tipo mobile, disaccoppiando il

branch and bound algorithm to further develop the UIC 406 and analyse capacity when traffic disturbances exist.

In the case of multi-track lines, in accordance with the [20], the theoretical capacity is calculated as follows in Equation (1):

$$TC = \frac{N \cdot 1320}{D_n} \quad (1)$$

Where N is the number of tracks, and D_n is the time spacing.

The practical capacity, instead, is lower than the theoretical one and depends on the heterotachicity coefficient K , which is bounded between 1.2 and 1.9:

$$CC = \frac{CTG}{K} \quad (2)$$

*From the work of COVIELLO *et al.*, [29] which considered the line between Milan and Bologna, it can be inferred that on Italian HS lines there is still some remaining unexploited capacity, especially in the soft evening and early morning hours. Moreover, if sensors were installed to monitor the infrastructure, it would be possible to optimise its maintenance slots and thus it would be possible to allocate more time during the night-time hours for freight trains. [30]*

This is precisely the framework in which this work is positioned, since, as already mentioned, it is intended to exploit the Turin-Verona HS line after the departure of the last passenger train and before the scheduled maintenance operations. Therefore, a next-generation train could bring optimised maintenance and increased capacity to the line under study. The line, still under construction in 2023 for the Brescia-Verona HS/HC (high capacity) section, is part of the TEN-T [31] Mediterranean corridor [32], which, by connecting south-western European countries to eastern countries, presents itself as a preferred route both for traffic between Europe and Asia and, within Europe. The project is expected to decrease travel time by 50% and it is part of the HS/HC branch of the Turin-Milan-Venice line, representing a north-to-east passage through northern Italy.

Being part of the TEN-T network, the HS network must ensure the interoperability requirements [33] and, in this regard, ERTMS level 2, ETCS baseline 3 release 2 [34] and GSM-R baseline 1 are being implemented on the Italian network according to the specific standard in this field [35] and rail safety regulations [36]. The impact of ERTMS implementation has been positive, as the technology allows for shorter block sections, thus shorter headways [37].

However, it is discoverable in the literature that when comparing braking curves with ETCS versus those with a conventional system, the formers are more conservative. Moreover, the infrastructure tends to have large capacity gains either with homogeneous service and long block sections, or with heterogeneous service and short block sections.

distanziamento dalla lunghezza della sezione di blocco. Il livello 3 dell'ERTMS è ancora in fase di perfezionamento [40] per aumentarne la sicurezza [41], l'affidabilità e la protezione [42]. I vantaggi del livello 3 dell'ERTMS non si limitano all'implementazione della tecnologia del blocco mobile, ma comprendono anche la possibilità di utilizzare boe virtuali, riducendo così i costi e gli sforzi di manutenzione sulla linea stessa. Il blocco mobile consente di recuperare ritardi e/o anticipi, risultando più robusto rispetto ad un segnalamento a blocco fisso concatenato, che potrebbe in via teorica garantire potenzialità similari, ma con propagazione del ritardo lungo l'orario dei treni.

Pertanto, sebbene non sia ancora pronto per l'implementazione, il sistema è stato preso in considerazione in questa analisi, come base per possibili applicazioni lungo l'infrastruttura AV allorquando utile.

3. Metodologia

Una panoramica della metodologia utilizzata è disponibile nella Fig. 3.

Per trovare delle grandezze complessive in grado di definire un progetto funzionale di un treno merci a potenza distribuita, è necessario condurre uno studio per individuare il campo di velocità più appropriate per effettuare un servizio omotachico sulle linee ad alta velocità, in tarda serata o di notte.

L'esercizio ferroviario è stato quindi simulato utilizzando Opentrack [43], noto software di microsimulazione sviluppato dall'ETH di Zurigo, che consente di considera-

tions, since it is difficult in the latter case for all trains to have braking distances comparable with the length of the block section [38].

However, the way to achieve a sensible improvement in rail capacity, particularly in order to be able to compensate for delays, would be to implement the third level of ERTMS [39], which still involves radio block systems, but of the moving type, decoupling the headway from the length of the block section. ERTMS level 3 is still under development [40] in order to increase its safety [41], reliability and security [42]. The benefits of ERTMS Level 3 are not limited to the implementation of the moving block technology but also encompass the possibility of using virtual balises, thus reducing maintenance costs and efforts on the line. The mobile block allows for recovering delays and/or advances, proving to be more robust than concatenated fixed-block signalling, which could theoretically provide similar daily or hourly capacity, but with delay propagation throughout the trains' timetable.

So, although not yet ready for implementation, the system was considered in this work as an operational baseline for future HS infrastructure whenever useful.

3. Methodology

An overview of the methodology used is available in Fig. 3.

To find aggregate quantities capable of defining a functional concept of a distributed power freight train, it is necessary to conduct a study to clarify the appropriate speed to run a homotachic service on high-speed lines in the late

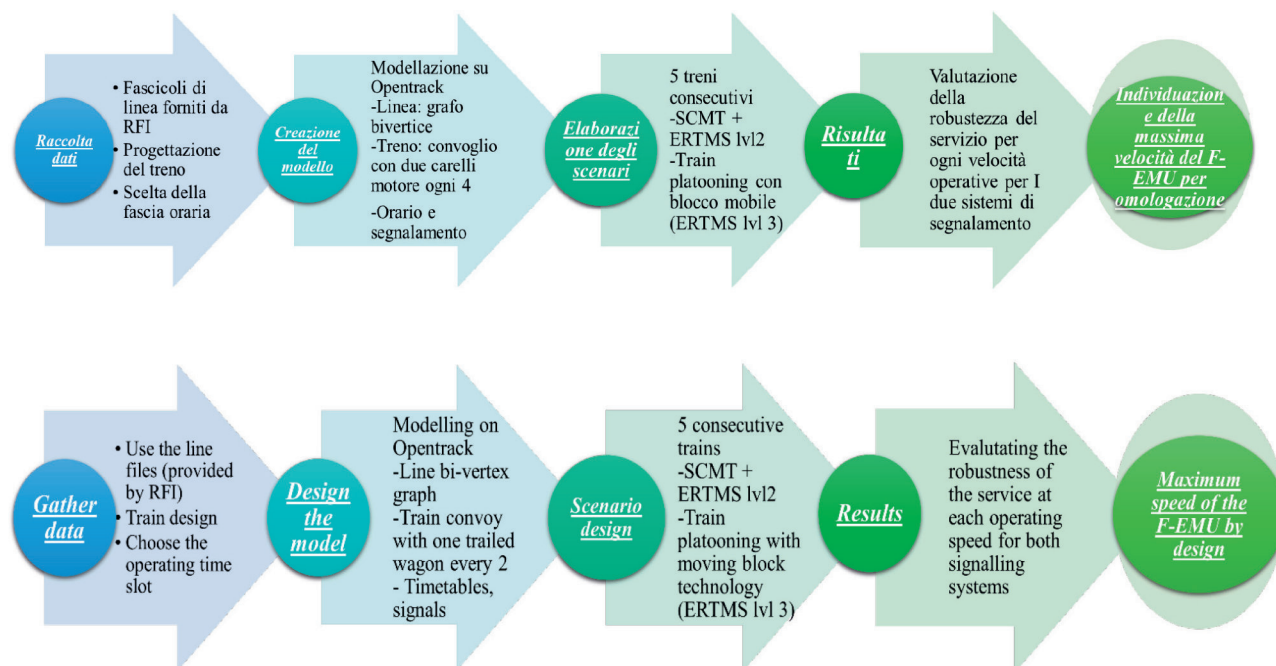


Figura 3 – Schema della metodologia di analisi.

Figure 3 – Methodology overview.

re tutti gli elementi del sistema ferroviario senza semplificazioni, modellando il movimento del treno in modo continuo e i segnali in modo discreto. Sono stati quindi definiti diversi scenari per stabilire l'influenza della velocità sulla stabilità e sulla robustezza dell'orario pianificato.

Il primo passo è stato quello di costruire il modello inserendo i dati di input relativi a:

- infrastruttura della linea Torino-Verona con i dati forniti da RFI (Rete Ferroviaria Italiana). La linea è rappresentata con un modello di nodi e archi, composto da 36 grafi che collegano le principali località lungo il percorso. Ogni grafo ha le sue caratteristiche topologiche (estratto nella Tab. 1), e ogni discontinuità determina l'inizio di un nuovo grafo;

evening or at night. Railway operation was, therefore, simulated using Opentrack [43], a well-know microsimulation software developed by ETH Zurich, which allows all the elements of the railway system to be considered without simplification by modelling the train's motion continuously and the signals at discrete time. Several scenarios were, then, defined to establish the influence of speed on the stability and robustness of the planned timetable.

The first step was to build the model by entering the input data concerning:

- Infrastructure of the Turin-Verona line with data provided by RFI. The line is represented with a nodes-and-arcs model, made up of 36 graphs connecting the main localities along the journey. Each graph has its topologi-

Tabella 1 – Table 1

Estratto delle caratteristiche di linea dai fascicoli RFI (Torino-Verona)
Excerpt of the infrastructural characteristics of the Torino-Verona line

TRATTA			L. tratta [km]	Sistema di Trazione	Regime di Circolazione	SCMT	Accesso senso Pari [%]	Accesso senso Dispari [%]	RANGO A		RANGO B		RANGO C		RANGO P		RANGO AV-AC	
N°	Località	Località							V _{min}	V _{max}	V _{min}	V _{max}	V _{min}	V _{max}	V _{min}	V _{max}	V _{min}	V _{max}
1	TO ORB. MOD.	TO ORB. FAR	1.333	3kV (c.c.)	Blocco elettrico automatico	SCMT	8	7	30	60	60	60						
2	TO ORB. FAR	Dev. TO ORB.	0.1	3kV (c.c.)	Blocco elettrico automatico	SCMT	10	3	60	60	60	60						
3	Dev. TO ORB.	TO S. Paolo	4.933	3kV (c.c.)	Blocco elettrico automatico	SCMT	10	3	60	60	60	60						
4	TO S. Paolo	B. Crocetta	1.391	3kV (c.c.)	Blocco elettrico automatico	SCMT	13	0	60	60	60	60	60	60	60	60		
5	B. Crocetta	PORTA SUSA	1.804	3kV (c.c.)	Blocco elettrico automatico	SCMT	0	0	90	90	95	95	100	100	100	100		
6	PORTA SUSA	TO Rebaudengo	3.509	3kV (c.c.)	Blocco elettrico automatico	SCMT	13	14	100	140	145	145	120	155	140	160		
7	TO Rebaudengo	TO Stura	3.486	3kV (c.c.)	Blocco elettrico automatico	SCMT	9	5	140	140	145	145	155	155	160	160		
8	TO Stura	ORIGINE LINEE AV	1.412	3kV (c.c.)	Blocco elettrico automatico	SCMT	7	3	100	100	100	100	100	100	100	100		
9	ORIGINE LINEE AV	Seg. Confine KM 0.938	0.722	3kV (c.c.)	Blocco elettrico automatico	SCMT	12	15	100	140	150	150	110	160	120	160		
10	Seg. Confine KM 0.938	PM CIGLIANO	30.06	25kV (c.a.)	Blocco Radio	ERTMS	12	15									160	300
11	PM CIGLIANO	PM ALICE CASTELLO	6.849	25kV (c.a.)	Blocco Radio	ERTMS	12	15									300	300
12	PM ALICE CASTELLO	PC RECETTO (AV/AC)	25.559	25kV (c.a.)	Blocco Radio	ERTMS	12	15									300	300
13	PC RECETTO	BIVIO NOVARA OVEST	15.88	25kV (c.a.)	Blocco Radio	ERTMS	12	15									300	300
14	BIVIO NOVARA OVEST	P.C. MARCALLO (AV/AC)	18.645	25kV (c.a.)	Blocco Radio	ERTMS	13	13									260	300
15	P.C. MARCALLO	SEGN. CONFINE KM 121.700	18.969	25kV (c.a.)	Blocco Radio	ERTMS	15	13									160	300
16	SEGN. CONFINE KM 121.700	RHO DEV. E. LINEA AV	0.353	3kV (c.c.)	Blocco elettrico automatico	SCMT	15	13	120	140	150	150	140	150	150	150		
17	RHO DEV. E. LINEA AV	MI CERTOSA AV/AC	4.536	3kV (c.c.)	Blocco elettrico automatico	SCMT	15	0	100	140	150	150	105	160	120	160		
18	MI CERTOSA AV/AC	BIVIO MUSSOCO (Cintura)	1.133	3kV (c.c.)	Blocco elettrico automatico	SCMT	1	6	80	80	85	85						
19	BIVIO MUSSOCO (Cintura)	TRIPLO BIVIO P.C. SEVESO (Cintura)	3.697	3kV (c.c.)	Blocco elettrico automatico	SCMT	3	6	80	80	85	85						
20	TRIPLO BIVIO P.C. SEVESO (Cintura)	QUADRIVIO P.C. TURRO (MERC)	2.099	3kV (c.c.)	Blocco elettrico automatico	SCMT	6	3	80	80	85	85						
21	QUADRIVIO P.C. TURRO (MERC)	MILANO LAMBRATE	2.044	3kV (c.c.)	Blocco elettrico automatico	SCMT	6	7	70	80	85	85						
22	MILANO LAMBRATE	POIOLTELLO (VENEZIA DD)	8.512	3kV (c.c.)	Blocco elettrico automatico	SCMT	9	5	80	140	145	145	90	150				
23	POIOLTELLO (VENEZIA DD)	MELZO SCALO (VENEZIA DD)	6.44	3kV (c.c.)	Blocco elettrico automatico	SCMT	2	1	140	140	160	160	150	180				
24	MELZO SCALO (VENEZIA DD)	BIVIO CASIRATE (VENEZIA DD)	8.675	3kV (c.c.)	Blocco elettrico automatico	SCMT	12	4	140	140	160	160	160	180				
25	BIVIO CASIRATE (VENEZIA DD)	SEGN. CONFINE KM 28	1.254	3kV (c.c.)	Blocco elettrico automatico	SCMT	1	4	140	140	160	160	200	200				
26	SEGN. CONFINE KM 28	PM BRESCIA OVEST	38.318	25kV (c.a.)	Blocco Radio	ERTMS	13	14									200	300
27	PM BRESCIA OVEST	SEGN. CONFINE BS EST	12.341	25kV (c.a.)	Blocco Radio	ERTMS	12	15									160	160
28	SEGN. CONFINE BS EST	BRESCIA EST (Fascio Ovest)	0.669	25kV (c.a.)	Blocco Radio	ERTMS	5	2									200	300
29	BRESCIA EST (Fascio Ovest)	BRESCIA EST FM	2.312	25kV (c.a.)	Blocco Radio	ERTMS											200	300
30	BRESCIA EST FM	DESENZANO	11.123	25kV (c.a.)	Blocco Radio	ERTMS											200	300
31	DESENZANO	PESCHIERA D.G.	6.166	25kV (c.a.)	Blocco Radio	ERTMS	12	15									200	300
32	PESCHIERA D.G.	CASTELNUOVO	11.231	25kV (c.a.)	Blocco Radio	ERTMS	12	15									200	300
33	CASTELNUOVO	PC VERONA MERCI	8.776	25kV (c.a.)	Blocco Radio	ERTMS	12	15									200	300
L. Tratta TOT [KM] =			291.276															

- materiale rotabile con dati estratti da GUALCO *et al.* [11] in Fig. 4 e Fig. 5. Per le resistenze ordinarie, viene utilizzata la formula di Davis per i vagoni motorizzati; per la resistenza in curva, invece, viene utilizzata la formula di von R ckl con scartamento di 1435 mm;
- il sistema di posizionamento   impostato con *balise* e antenne radio, per consentire l'utilizzo del blocco mobile;
- segnalamento con sezioni di blocco fisse secondo i piani schematici RFI;
- inter-distanza delle sottostazioni di alimentazione in base alle caratteristiche dell'infrastruttura.

Gli scenari considerati prevedono fino a 5 treni consecutivi che circolano sulla linea, con un intervallo di tempo omogeneo di 7 minuti, come previsto da RFI.

Sono state considerate tre velocit  massime di regime (o crociera): si vuole valutare quale sia la pi  appropriata tra 120 km/h (la velocit  massima raggiungibile dai treni merci convenzionali), 140 km/h e 160 km/h (limite di resistenza dei teloni delle casse mobili, telonate o centinate, anche se la fiche UIC 592 deve garantire fino a 120 km/h), per conseguire un orario robusto nonostante i possibili ritardi.

L'analisi   stata ripetuta considerando, oltre all'attuale sistema di segnalamento (SCMT con ERTMS livello 2), un sistema a blocco mobile che consente il *platooning* dei treni, quindi un intervallo non omogeneo tra i treni che dipende solo dal tempo di arresto di quello che insegue.

Nelle simulazioni, tutte le potenzialit  del sistema vengono sfruttate al massimo e si ottiene un profilo di marcia 'ottimistico' rispetto alle caratteristiche operative reali, dove possono verificarsi prestazioni inferiori del 5-15%.

Tra i diversi approcci esistenti in letteratura per calcolare la capacit    stato scelto il metodo di GENOVESI e RONZINO [36] in quanto esso permette di distinguere tra la capacit  teorica del blocco fisso e quella del blocco mobile. Nel caso di sezioni di blocco con lunghezza fissa, la distanza minima tra due treni   pari alla somma di una distanza fissa $d(n,b)$, che dipende dalla lunghezza della sezione di blocco b e dal numero n di aspetti che un segnale concatenato pu  assumere secondo quanto segue:

$$d(n,b) = b + \frac{b}{n-2} = \frac{n-1}{n-2} \cdot b \quad (3)$$

A questo si aggiungono la lunghezza del treno L_t e un franco di sicurezza f , che restituisce il distanziamento minimo δ_{min} come segue:

$$\delta_{min} = d(n,b) + L_t + f \quad (4)$$

La capacit  in funzione della velocit , nel caso di blocco fisso a n aspetti  :

cal characteristics (excerpt in Tab. 1), and every discontinuity determines the beginning of a new graph.

- *Rolling stock with data extracted from GUALCO et al. [11], presented in Fig. 4 and Fig. 5. For the ordinary resistances, the Davis formula for powered wagons is used, while the Von R ckl formula for 1435 mm rail gauge is used for curve resistance.*
- *The positioning system is set up with loop balises and radio antennae, to allow the use of the moving block.*
- *Signalling with fixed block sections according to RFI schematic plans.*
- *Power supply substations inter-distance according to the infrastructure characteristics.*

The scenarios considered involve up to 5 consecutive trains running on the line, with a homogeneous time interval of 7 minutes. Three maximum cruising speeds have been considered: it is intended to assess which is most appropriate between 120 km/h (i.e., the maximum speed attainable by conventional freight trains), 140 km/h and 160 km/h (limit for swap-bodies tarpaulin actual resistance, though the leaflet UIC 592 has to guarantee up to 120 km/h), to achieve a robust timetable despite possible delays.

The analysis has been repeated considering, instead of the current signalling system (SCMT and ERTMS level 2), a moving block signalling system allowing train platooning and therefore a non-homogeneous interval between trains dependent only on the stopping time of the chasing one.

In the simulations, all the carrying capacities of the system are exploited to the maximum and an 'optimistic' running profile is obtained compared to the real operating characteristics, where performances 5 to 15% lower can occur.

Among the different approaches that exist in the literature to calculate the capacity, the method of GENOVESI and RONZINO [37] was chosen in this work. In fact, it allows differentiating between theoretical capacity of the fixed block and the moving block. In the case of block sections with fixed length, the minimum distance between two trains is equal to the sum of a fixed distance $d(n,b)$, which depends on the length of the block section b and the number n of aspects that a concatenated signal can take, according to the following formula:

$$d(n,b) = b + \frac{b}{n-2} = \frac{n-1}{n-2} \cdot b \quad (3)$$

To this the length of the train L_t and a safety space f are added, giving the minimum headway δ_{min} as follows:

$$\delta_{min} = d(n,b) + L_t + f \quad (4)$$

The capacity as function of the speed, in the case of fixed n -aspect block is:

$$q = \frac{v}{\left(\frac{n-1}{n-2} \cdot b + L_t + f\right)} \quad (5)$$

Nel caso più comune con $n=3$, il coefficiente di b è pari a 2, il che significa che la distanza minima tra due treni è pari al doppio della sezione del blocco.

Per il blocco mobile, invece, il distanziamento minimo si ottiene dalla somma dello spazio di frenata, della lunghezza del treno L_t e di un franco di sicurezza f :

$$\delta_{min} = \frac{v}{2\gamma} + L_t + f \quad (6)$$

Dove v è la velocità iniziale e γ la decelerazione costante del convoglio.

In questo caso, si ottiene la curva della capacità in funzione della velocità:

$$q = \frac{v}{\left(\frac{v}{2\gamma} + L_t + f\right)} \quad (7)$$

Tuttavia, è necessario considerare due fattori correttivi:

- il coefficiente di ritardo D , che è definito come la quantità di tempo persa da un generico convoglio a causa della presenza di qualsiasi possibile causa mentre percorre la distanza unitaria. L'unità di misura è [s/m];
- il coefficiente di stabilità χ_{line} che definisce il numero massimo di treni coinvolti nel ritardo di un treno precedente. Si dice che un flusso è stabile se ogni treno in caso di ritardo coinvolge un numero di treni inferiore a una soglia predeterminata, che è una funzione della qualità del servizio desiderata. Il valore di stabilità di un'intera linea è pari alla media ponderata, rispetto alle distanze tra le stazioni i e j , dei coefficienti valutati per ogni sezione:

$$\chi_{line} = \frac{\sum \chi(i,j) \cdot L_{\{i,j\}}}{\sum L_{\{i,j\}}} \quad (8)$$

4. Simulazioni e risultati

Le simulazioni hanno l'obiettivo di portare a termine un servizio avente fino a 5 treni in partenza da Torino Orbassano alle 22:00, per non causare interferenze con i treni passeggeri la cui ultima corsa da Torino Porta Nuova è alle ore 21:20, e in arrivo a Verona Scalo prima della fascia oraria di manutenzione programmata (IPO), ufficialmente prevista dalle 01:00 alle 06:00. Questo target è stato valutato come adeguato a seguito di discussioni con operatori ferroviari. Si vuole infatti ricercare un servizio che, anche se risulta sovradimensionato rispetto alla domanda

$$q = \frac{v}{\left(\frac{n-1}{n-2} \cdot b + L_t + f\right)} \quad (5)$$

In the most common case, with $n=3$, the coefficient of b is equal to 2, which means that the minimum distance between two trains is twice the block section.

For the moving block, on the other hand, the minimum spatial spacing is obtained from the sum of the braking space, the length of the train L_t , and a safety gap f :

$$\delta_{min} = \frac{v}{2\gamma} + L_t + f \quad (6)$$

Where v is the initial speed and γ the constant deceleration of the trainset.

In this case, the curve of the capacity as function of the speed results:

$$q = \frac{v}{\left(\frac{v}{2\gamma} + L_t + f\right)} \quad (7)$$

However, two corrective factors must be considered:

- *the delay coefficient D , which is defined as the amount of time lost by a generic convoy due to the presence of any possible cause while travelling the unit distance. The unit of measure is [s/m];*
- *the stability coefficient χ_{line} which defines the maximum number of trains involved by the delay of a preceding train. A flow is said to be stable if each train, in the case of delay, involves a number of trains below a predetermined threshold, which is a function of the desired quality of service. The stability value of an entire line is equal to the weighted average, with respect to the distances between stations i and j , of the coefficients evaluated for each section:*

$$\chi_{line} = \frac{\sum \chi(i,j) \cdot L_{\{i,j\}}}{\sum L_{\{i,j\}}} \quad (8)$$

4. Simulations and results

The goal of the simulations was to carry out a service with up to 5 trains, departing from Turin Orbassano terminal at 10 p.m. – so as not to cause interference with passenger trains whose last run from Turin Porta Nuova station is at 9:20 p.m. – and arriving in Verona Scalo (i.e., terminal) before the scheduled maintenance timeslot (IPO), officially foreseen from 01:00 to 06:00. This target has been evaluated as appropriate as a result of discussions with rail operators. In fact, it is intended to look for a service that, even if it is oversized compared to current transport demand, considers the attractiveness of the service itself. As such, the F-EMU may be able to erode demand to the road by its very characteristics. With five trains of this kind at

di trasporto attuale, consideri l'attrattività del servizio stesso. In questo caso il convoglio F-EMU potrebbe riuscire ad erodere domanda alla strada per le sue stesse caratteristiche. Con 5 treni di questo genere al massimo della capacità si trasportano 495 TEU per senso di marcia. Prevedere un servizio così alto, in via teorica, permette di avere la possibilità di operare almeno il 60-70% di esso nella pratica.

In primo luogo, è stato valutato lo scenario ideale con l'attuale sistema di segnalamento. Una velocità di 120 km/h non garantirebbe l'arrivo di tutti i treni entro l'orario previsto e, pertanto, questi rischierebbero di essere soppressi (Tabella 2). Una velocità di 160 km/h, invece, garantisce una velocità operativa di 144 km/h (escludendo i tratti di linea corrispondenti agli hub, dove la velocità massima per un treno merci è fissata a 60 km/h) e, di conseguenza, il margine è sufficientemente ampio per ottenere un servizio robusto.

Gli *headway* del blocco fisso sono stati scelti in base alle prescrizioni in uso da RFI. Il gestore dell'infrastruttura ha indicato tempi di percorrenza di 7 minuti per una velocità di 160 km/h, 8 minuti per 140 km/h e 9 minuti per 120 km/h. Il calcolo della capacità pratica della linea ferroviaria viene anch'esso effettuato su queste tempistiche, e si considera pari al 65% della capacità teorica.

La fattibilità del servizio viene poi valutata mediante l'introduzione di ritardi. OpenTrack consente di assegnare un ritardo solo alla partenza dei treni, utilizzando, nella fattispecie, una distribuzione lineare a tratti, combinata con un numero generato in modo casuale. Questo rappresenta i potenziali ritardi accumulati lungo il percorso. Nella Tabella 3 è riportata la distribuzione utilizzata per la creazione degli scenari.

Escludendo la velocità di 120 km/h, sono stati simulati 40 diversi scenari corrispondenti ai diversi ritardi casuali assegnati dal software per le due velocità rimanenti. Nel caso di una velocità di 140 km/h, c'è una probabilità di superare il limite di tempo del 24%, mentre nel caso di 160 km/h è solo del 12%. Pertanto, nel caso di un treno ad alte prestazioni, la probabilità di ritardi che interessano lo *slot* di manutenzione può essere ridotta con successo. Infine, è stata presa in considerazione una modifica del sistema di segnalamento, consentendo la possibilità del *platooning* dei treni. La distanza di frenata è calcolata tramite integrazione tabellare.

Si riportano in Tab. 4 i parametri principali del convoglio F-EMU, necessari per il calcolo.

I risultati sono riportati in Tab. 5.

Nella Fig. 6 è possibile confrontare le curve di capacità teoriche in funzione della velocità, calcolate come descritto nel paragrafo Metodologia, considerando un franco di sicurezza *f* pari alla lunghezza del treno ovvero 740 m.

La distanza temporale minima si ottiene con l'inverso della capacità:

maximum capacity, 495 TEUs can be transported in each direction. Providing for this high level of service in theory allows for the possibility of operating at least 60-70% of it in practice.

At first, the ideal scenario with the current signalling system was evaluated. A speed of 120 km/h would not guarantee the arrival of all the trains within the scheduled time, and, therefore, they would run the risk of being suppressed (Tab. 2). A speed of 160 km/h, on the other hand, guarantees an operational speed of 144 km/h (excluding the line sections corresponding to the hubs where the maximum speed for a freight train is set at 60 km/h) and, consequently, the margin is large enough to achieve a robust service.

The fixed-block headway was chosen according to the prescriptions in use by RFI, which reported headways of 7

Tabella 2 – Table 2

Scenario 1: nessun ritardo. È possibile apprezzare che i tempi di viaggio a velocità più basse non consentano di completare il servizio prima del limite indicato, se non con un solo convoglio. I servizi a rischio soppressione sono evidenziati in giallo

Scenario 1: with no delays. It is possible to appreciate that the travel times at lower speed do not allow to complete the service before the intended threshold if not for a single train. The services at risk of being suppressed are highlighted in yellow

Viaggio Torino Orbassano-Verona Scalo
Trip Turin Orbassano-Verona Scalo (terminal)

Velocità massima Maximum speed	Partenza Departure time	Arrivo Arrival time	Tempo di viaggio [h:min:s] Travel time [h:min:s]
120 km/h	22:00:00	00:59:00	02:59:00
	22:09:00	01:08:00	
	22:18:00	01:17:00	
	22:27:00	01:26:00	
	22:36:00	01:35:00	
140 km/h	22:00:00	00:41:00	02:41:00
	22:08:00	00:49:00	
	22:16:00	00:57:00	
	22:24:00	01:05:00	
	22:32:00	01:13:00	
160 km/h	22:00:00	00:29:00	02:29:00
	22:07:00	00:36:00	
	22:14:00	00:43:00	
	22:21:00	00:50:00	
	22:28:00	00:57:00	

Tabella 3 – Table 3

Distribuzione di probabilità per il ritardo
Delay probability distribution

Da [s] From [s]	a [s] To [s]	Probabilità Probability
0	300	20
300	600	20
600	900	20
900	1800	20
1800	3600	20

$$t_{spacing} = 1/q_{th}$$

(10)

Dunque il cadenzamento minimo per la capacità teorica è espressa in Tab. 6.

Si ricorda, infine, che la capacità pratica è indicativamente il 60-70% di quella teorica. Considerando il 65% si ottiene il risultato di Tab. 7.

Le simulazioni con OpenTrack per gli scenari di blocco mobile sono state effettuate per tutte e tre le velocità considerate e i risultati sono mostrati nella Tab. 8. È possibile osservare gli orari grafici in appendice.

5. Discussione dei risultati

Dai calcoli effettuati, una velocità di 160 km/h risulta essere il miglior compromesso tecnico tra servizio veloce e massimizzazione della capacità della linea. Perseguire velocità superiori oltre a compromettere gli aspetti energetici anche la crescita dei consumi il quadrato della velocità, comprometterebbe la resistenza dei teloni delle casse mobili e causerebbe anche una sensibile diminuzione della capacità nel caso di utilizzo del blocco mobile, a causa dell'aumento della lunghezza dello spazio di arresto.

Si deduce quindi che nella progettazione di un nuovo treno merci, dato che la velocità massima a regime (di crociera) dovrà raggiungere i 160 km/h, sarà necessario riprogettare i carrelli, a partire dal passo e dal siste-

minutes for a speed of 160 km/h, 8 minutes for 140 km/h and 9 minutes for 120 km/h. The calculation of the practical capacity of the railway line will also be made on these timings, and it will be considered as 65% of the theoretical capacity.

The feasibility of the service is then evaluated by introducing delays. OpenTrack allows a delay to be assigned only to the departure of trains using, in this case, a piecewise linear distribution, combined with a randomly generated number. This could represent potential delays accumulated along the route. In Tab. 3 the distribution used in the creation of the scenarios is shown.

Excluding the speed of 120 km/h, 40 different scenarios were simulated, corresponding to the different random delays assigned by the software for the two remaining speeds. In the case of a speed of 140 km/h, there is a probability of exceeding the time limit of 24%, while in the case of 160 km/h is only 12%. Hence, we demonstrated that with a

Sforzo frenante F-EMU Braking force F-EMU

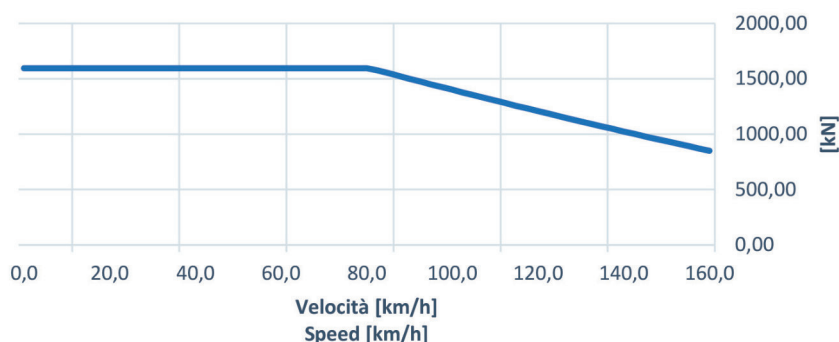


Figura 4 – Diagramma Sforzo frenante - Velocità per il convoglio F-EMU.
Figure 4 – F-EMU Braking Force-velocity diagram.

Sforzo di Trazione F-EMU Tractive effort F-EMU

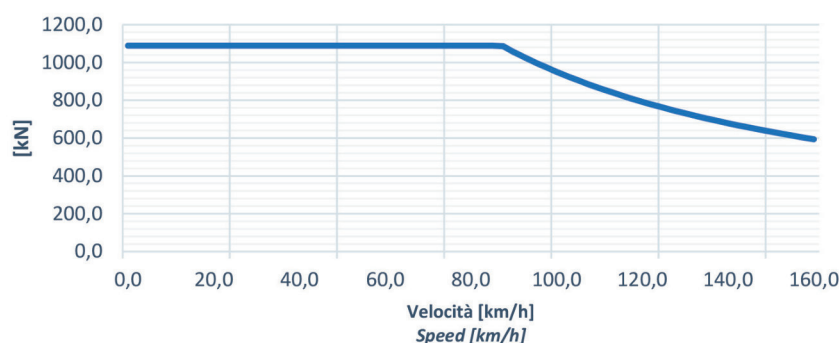


Figura 5 – Diagramma Trazione-Velocità per il convoglio F-EMU.
Figure 5 – F-EMU Traction effort-velocity diagram.

Tabella 4 – Table 4

Dati di input per il convoglio F-EMU
F-EMU Input Data

Dati in ingresso
Input data

Numero unità <i>N. of modules</i>	11	#
Potenza nom. <i>Total power</i>	26400	kW
Sforzo spunto <i>Breakaway force</i>	1089,2	kN
Massa totale <i>Total mass</i>	2310	t/treno <i>t/train</i>
Massa aderente <i>Adherent mass</i>	770	t/treno <i>t/train</i>
Coefficiente aderenza <i>Adherence coefficient</i>	0,2	/
Livelletta <i>Grade</i>	15	‰
Lunghezza <i>Length</i>	740	m
Res. rotolam. <i>Rolling resistance</i>	0,0025	t/t
a	2,5	t/t
b	0,0003	t/t/(km/h)/(km/h)

Tabella 5 – Table 5

Risultati dell'integrazione tabellare per il calcolo dei
tempi e degli spazi di arresto

Tabular integration results: braking time and braking space

v [km/h]	$t_{arresto}$ [s]	$s_{arresto}$ [m]
160	68,7	1637,6
140	57,5	1171,4
120	47,6	811,3

Tabella 6 – Table 6

Cadenzamento teorico minimo
Minimum theoretical headway

v [km/h]	Cadenzamento [s]
160	70,1
140	68,2
120	68,7

Tabella 7 – Table 7

Cadenzamento pratico
Practical headway

v [km/h]	$q_{pratica}$ [treni/h] $p_{practical}$ [trains/h]	Cadenzamento [s] Headway [s]
160	33,36	107,9
140	34,32	104,9
120	34,04	105,8

ma di sospensioni per ottenere l'omologazione per l'esercizio su linee ad alta velocità.

Inoltre, vale la pena ricordare in questo contesto che gli standard della rete trans-europea dei trasporti (TEN-T) hanno fissato una velocità obiettivo di 100 km/h per i treni merci sull'intera rete europea entro il 2030 [45][46]. Il F-EMU si dimostrerebbe quindi in grado di raggiungere questo obiettivo e di migliorarlo, ponendo così attrarre quella domanda associata a necessità di tempi contenuti, rendendo peraltro il trasporto ferroviario ben più attrattivo di quello stradale anche su questo fronte. Si citano infine le linee guida sulla progettazione delle linee AV in Italia, in cui si fa riferimento proprio ad una velocità di 160 km/h per i treni merci con 22,5 tonnellate per asse. Il F-EMU, dunque, essendo molto più leggero

Capacità teorica Theoretical capacity

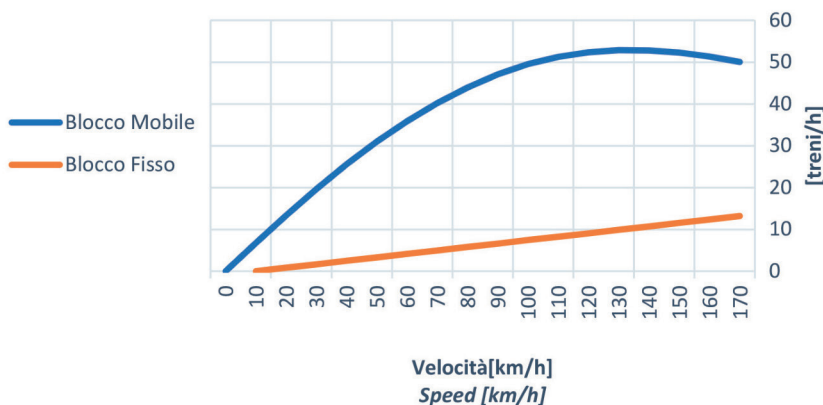


Figura 6 – Confronto della capacità teorica con blocco fisso e blocco mobile. È possibile apprezzare l'ampio guadagno teorico derivante dall'uso del blocco mobile.

Figure 6 – Comparison of Theoretical capacity for fixed and moving block. It is possible to appreciate the wide theoretical increase in capacity using the moving block.

Tabella 8 – Table 8

Tempi di percorrenza con il blocco mobile. È possibile notare come, dato il distanziamento molto più breve, solo una velocità di 120 km/h non sarebbe adeguata ad arrivare prima dell'orario di inizio IPO
Travel Times with moving block scenario. A speed of 120 km/h is not sufficient to reliably arrive before 1 a.m

Viaggio Torino Orbassano-Verona Scalo
Trip Turin Orbassano-Verona Scalo (terminal)

Velocità massima Maximum speed	Partenza Departure time	Arrivo Arrival time	Tempo di viaggio [h:min:s] Travel time [h:min:s]
120 km/h	22:00:00	00:59:00	02:59:00
	22:01:46	01:00:46	
	22:03:32	01:02:32	
	22:05:18	01:04:18	
	22:07:04	01:06:04	
140 km/h	22:00:00	00:41:00	02:41:00
	22:01:45	00:42:45	
	22:03:30	00:44:30	
	22:05:15	00:46:15	
	22:07:00	00:48:00	
160 km/h	22:00:00	00:29:00	02:29:00
	22:01:48	00:30:48	
	22:03:36	00:32:36	
	22:05:24	00:34:24	
	22:07:12	00:36:12	

(17.5 t/asse), non causerebbe problemi all'infrastruttura su cui circola.

I risultati ottenuti in questo lavoro, per quanto riguarda la capacità raggiungibile con il blocco mobile, sono da considerarsi teorici. Va infatti ricordato che la capacità pratica si aggira solitamente intorno al 70% circa di quella calcolata. Inoltre, si ipotizza che la potenza assorbibile sulla linea aumenti con l'implementazione di questo tipo di sistema di segnalamento. In realtà, con l'attuale potenza media assorbibile tra due sottostazioni elettriche in una linea ad alta velocità, non è possibile per il F-EMU raggiungere intertempi così brevi (70 secondi per la capacità teorica e circa 108" nel caso della capacità pratica) a causa della quantità di potenza richiesta in media (pari a circa 4 volte quella di una locomotiva elettrica europea classica, non solo per le velocità raggiunte da masse elevate, ma anche per l'operabilità del treno su linee tradizionali con livellette elevate). A questo proposito, quindi, è necessario condurre ulteriori indagini per avvalorare l'adozione di ta-

high-performance train, the probability of delays affecting the maintenance slot can be successfully reduced.

Eventually, a change in the signalling system has been considered, allowing the possibility of train platooning. Braking distance is calculated by tabular integration.

The relevant parameters of the F-EMU, required for calculation, are provided in Tab. 4.

The results are shown in the Tab. 5.

Fig. 6 compares the theoretical capacity curves of the fixed block and the moving block as a function of speed, calculated as described in the Methodology section, considering a safety clearance f equal to the length of the train i.e., 740 m.

The minimum time distance is obtained with the inverse of capacity:

$$t_{\text{spacing}} = 1/q_{\text{th}} \quad (10)$$

Thus, the minimum headway for theoretical capacity results (Tab. 6).

Finally, it should be recalled that practical capacity is around 60-70% of theoretical capacity. Considering 65% results in (Tab. 7).

Simulations with OpenTrack for the moving block scenarios were carried out for all three speeds considered, and the results are shown in Tab. 8. In Appendix the graphical timetables for the three velocities are shown.

5. Discussion

A speed of 160 km/h appears, from the calculations, to be the best technical compromise between fast service and maximising line capacity. Aiming at higher speeds, besides undermining the energy efficiency given that the consumption grows with the square of the speed, would compromise the strength of the swap bodies tarpaulins and would also cause an appreciable decrease in capacity if the moving block was used, due to the increased length of the stopping space.

Thus, it is inferred that when designing a new freight train, given that the maximum cruising speed will have to attain 160 km/h, it will be necessary to re-design the bogies, starting with the wheelbase and suspension system to obtain homologation for the operation on high-speed/high capacity lines.

Besides, worth mentioning in this context is that the trans-European network for transport (TEN-T) regulations have set a target speed of 100 km/h for freight trains on the entire European network by 2030 [44][45]. The F-EMU would thus prove capable of achieving this goal and improving it, thus being able to attract that demand associated with tight travel times, incidentally making rail transport even more attractive than road transport on this front as well. Finally, it is worth to mention the guidelines on the design of HS lines in Italy, in which reference is made precisely to a speed of 160 km/h for freight trains with 22.5 tons per axle. The F-EMU therefore, being much lighter (17.5

le sistema di segnalamento a fronte di ingenti investimenti per il potenziamento della linea elettrica.

Inoltre, considerando il problema della robustezza dell'orario qui esposto, ovvero un servizio omotachico di cinque treni dopo il termine dell'orario di servizio dei treni passeggeri e prima della manutenzione notturna programmata, si potrebbero prendere in considerazione altre soluzioni che esulano dai risultati trovati in fase di simulazione come, ad esempio:

- a. scegliere una velocità superiore che consenta una minore probabilità di superare l'attuale limite di tempo, nonostante questa provochi una riduzione della capacità se si implementasse il blocco mobile ed un aumento dei consumi; in questo caso non si dovrebbe consentire il trasporto di casse mobili o semirimorchi telonati sul treno. Infatti, secondo la fiche UIC 592, i teloni delle casse mobili e dei semirimorchi telonati sono omologati per resistere fino a 120 km/h, anche se in deroga a questa prescrizione sono utilizzati carri che viaggiano a 140 km/h;
- b. anticipare gli orari di partenza dei treni dalle 22:00 alle 21:20 (verificando che non ci siano altri ritardi dovuti alla precedenza dei treni passeggeri che circolano ancora sulla linea in quella fascia oraria e potrebbero subire ritardi);
- c. posizionamento di una fermata del convoglio F-EMU nei pressi della Stazione di Milano intorno alle 23:30 per consentire un eventuale carico e scarico di UTI. Il treno ripartirebbe in direzione di Verona non appena terminata la fascia oraria di manutenzione;
- d. aumento della velocità massima di 60 km/h, fissata per i treni merci tradizionali intorno ai nodi ferroviari;
- e. equipaggiando il convoglio F-EMU con un sistema di monitoraggio dei binari. In questo modo, in cambio di uno sconto sul pedaggio di accesso dei treni merci all'AV, il gestore dell'infrastruttura può ottimizzare la programmazione della manutenzione riducendo la fascia oraria prescritta per l'IPO.

Ci si potrebbe chiedere se il convoglio F-EMU possa essere considerato davvero un treno merci ad alta velocità. Negli ultimi anni si è provato a trovare delle soluzioni che possano qualificarsi come trasporti ad alta velocità, si vedano i casi del Mercitalia Fast o del TGV Postal. Entrambi hanno però interrotto il proprio servizio in quanto non si integravano nelle logiche di una logistica intermodale, consentendo solo il trasporto di *groupage* trattandosi di treni passeggeri modificati, prendendo spunto da pratiche di conversione molto usate in campo aereo. Questi tentativi falliti sottolineano ancor di più la necessità di un prodotto pensato appositamente per il mercato merci, come il convoglio F-EMU che attualmente è in fase di sviluppo. Sono infatti in corso ricerche su come si possa ovviare dal punto di vista fisico ai problemi di dinamica e aereo-

tons/axle), would not cause problems for the infrastructure on which it runs.

The results obtained in this work, as far as the achievable capacity with the moving block is concerned, are to be considered theoretical. In fact, it should be recalled that the practical capacity is usually around 70% of the computed one. Moreover, it is assumed that the power that can be absorbed on the line is subject to an increase upon the implementation of this kind of signalling system. In fact, with the present average absorbable power between two electrical substations in a high-speed line, such short headways cannot be achieved by the F-EMU (70 seconds for theoretical capacity and about 108 s in the case of practical capacity) due to the amount of power requested on average (approximately 4 times that of a conventional European electric locomotive, not only because of the speeds achieved by high masses but also because of the train's operability on conventional lines with high grades). In this regard, therefore, further investigations need to be conducted in order to corroborate the adoption of such a signalling system against substantial investment in upgrading the power supply line.

In addition, considering the problem of the robustness of the timetable designed as a homotachic service after the end of passenger trains' service hours and before scheduled night maintenance, there are other solutions that could be considered which are beyond the results found in the simulation phase:

- a. *Choosing a higher speed that allows a lower probability of exceeding the current time limit, despite the lower capacity of the line in case ERTMS level 3 was used, with higher energy consumption. In this case no swap body or tarpaulin semi-trailer should be admitted on the train. In fact, according to UIC fiche 592, the tarpaulins of swap bodies and semi-trailers are approved to guarantee up to 120 km/h, although, derogating this prescription, they are used in some applications on wagons travelling at 140 km/h.*
- b. *Advancing the departure times of the trains from 10:00 p.m. to 9:20 p.m. (verifying that there are no other delays due to the precedence of the passenger trains that still circulate on the line in that timeslot and could have some delay).*
- c. *Placing a stop of the F-EMU near the Milan Station around 11:30 p.m. to allow possible loading and unloading of ITUs (Intermodal Transport Units). The train would leave headed to Verona as soon as the maintenance time slot ends.*
- d. *Increasing the maximum speed of 60 km/h, set for traditional freight trains around the railway nodes.*
- e. *Equipping the F-EMU with a track monitoring system. In this way, in exchange for a discount on the freight train access toll on the HS, the infrastructure manager can optimize maintenance scheduling by reducing the prescribed time slot for the IPO.*

It might be asked whether the F-EMU can really be considered a high-speed freight train. In recent years attempts

dinamica che nascono dall'operare un treno di queste fattezze, su soluzioni innovative di trazione ibrida decarbonizzata e sulla possibilità di modificare i ganci al fine di garantirne flessibilità e maggiore velocità nelle operazioni terminalistiche.

6. Conclusioni

Obiettivo di questa analisi è stato analizzare quale potrebbe essere la velocità più adatta per un servizio di trasporto merci ferroviario omotachico ad alta velocità, notturno, a seguito del termine del servizio passeggeri. È stato predisposto un modello su OpenTrack per simulare l'esercizio di un convoglio F-EMU ad alta velocità di nuova generazione sulla linea Torino-Verona, in Italia. Si è dimostrato che per velocità massime di 160 km/h è possibile ottenere il tempo di viaggio più breve perseguibile e la massima affidabilità, rendendolo una scelta preferibile per la progettazione di questi nuovi treni. Il problema relativo alla robustezza dell'orario risulta pienamente risolvibile attraverso l'implementazione del blocco mobile, adatto anche a recuperare ritardi, che comporta un sensibile aumento della capacità teorica, con saturazione a 140 km/h (52,8 treni/h) ma ancora eccellente per 160 km/h (51,3 treni/h ipotetici), rispetto ai 13 treni/h con l'attuale sistema di segnalamento, rendendo così i 160 km/h un buon compromesso tra velocità e capacità. Ad ogni modo, anche mantenendo il blocco fisso con sezioni concatenate si riuscirebbe a garantire il numero di treni programmato, seppure con minore garanzia di mantenere il servizio nel caso di anomalie. Anche col sistema di segnalamento attuale, come si vede dalle analisi con ritardo, si ha un livello di rischio di soppressione relativamente basso e comunque si potrebbero garantire 3 treni anche con ritardi di più di un quarto d'ora, piuttosto importanti per un servizio omotachico su linee ad alta velocità. È possibile, poi, assumere che i ritardi su questa tratta per il convoglio F-EMU, non fermando se non una volta giunto a destinazione, sono puramente esogeni, ovvero relativi alle condizioni della linea su cui il treno viaggia.

Nonostante la natura parzialmente teorica dei risultati trovati, questo studio dimostra come sia possibile sfruttare la capacità residua serale-notturna delle linee ad alta velocità italiane con l'inserimento di treni merci di nuova generazione, sui quali sono attualmente in corso altri studi per definirne meglio le prestazioni, le caratteristiche meccaniche e la potenziale attrattività per le imprese ferroviarie nonché i produttori di treni.

La fattibilità di un servizio veloce (circa 2,5 ore) prima della fascia oraria di manutenzione programmata, con velocità massime moderatamente elevate, pari a 160 km/h, consentirebbe di attrarre la domanda da mercati attualmente inaccessibili al trasporto merci ferroviario tradizionale. È importante osservare che un singolo camion im-

have been made to find solutions that could qualify as high-speed haulage, as the cases of the Mercitalia Fast or the TGV Postal. Both, however, interrupted their service because they did not fit into the logic of an intermodal logistics, allowing only groupage transport given that they are modified passenger trains, taking their cue from conversion practices extensively used in the airline field. These failed attempts further emphasize the need for a product designed specifically for the freight market, such as the F-EMU that is currently under development. In fact, research is underway on how the problems of dynamics and aerodynamics that arise from operating a train with such characteristics can be physically addressed on innovative decarbonized hybrid traction solutions, and on the possibility of modifying the couplers in order to provide flexibility and faster terminal operations.

6. Conclusions

The aim of this study was to investigate what can be a suitable speed for a high-speed homotachic rail freight service at night, after the end of the passenger service. A model to simulate the operation of a new-generation high-speed F-EMU on the Torino-Verona line in Italy has been implemented, using OpenTrack. It has been shown that for maximum speeds of 160 km/h it is possible to obtain the shortest travel time and the maximum reliability, making it a preferable choice for the design of these new trainsets. The issue related to the robustness of the timetable is completely solvable through the implementation of the mobile block that results in a sensible increase in theoretical capacity, with saturation at 140 km/h (theoretically 52,8 trains/h) but still excellent for 160 km/h (51,3 trains/h), versus the 13 trains/h with the current signalling system, thus making 160 km/h a good compromise between speed and capacity. However, even maintaining the fixed block with concatenated sections would still be able to guarantee the planned number of trains, albeit less guarantee of maintaining the service in case of anomalies. Even with the current signalling system, as it can be seen from the analysis using delays, there is a relatively low level of suppression risk and still 3 trains could be guaranteed even with delays of more than a quarter of an hour, which is quite important for a homotachic service on high-speed lines. In fact, it could be assumed that the delays on this line for the F-EMU, since it does not stop other than upon reaching its destination, are purely exogenous, i.e., related to the conditions of the line on which the train travels.

Despite the partially theoretical nature of the results found, this study demonstrates how it would be possible to exploit the residual capacity at night-time of the Italian high-speed lines with the insertion of described new generation freight trains, on which other studies are currently underway to better define their performances, mechanical characteristics as well as the potential attractiveness for the railway companies or undertakers and the train manufacturer.

The feasibility of a fast service (indicatively 2.5 hours long) before the scheduled maintenance time slot, with moderately high maximum speeds of 160 km/h, would make it possible to attract demand from markets that are

piega, senza interruzioni o traffico di rilievo, circa 3,5 ore sullo stesso percorso, mentre un treno merci convenzionale può impiegare fino a 3 o 4 volte tale tempo.

In conclusione, il convoglio F-EMU potrebbe essere una via importante per raggiungere gli obiettivi europei di sostenibilità, decongestionando le strade, contenendo i consumi con conseguenti emissioni, e riducendo i costi unitari di trasporto.

currently inaccessible to conventional rail freight transport. It is important to observe that a single road truck, with no major disruptions or traffic, takes about 3.5 hours on the same route, while a conventional freight train can take up to 3 or 4 times as long.

In conclusion, a F-EMU, could be a viable solution to comply with the European sustainability objectives, decongesting roads, limiting energy consumption and the associated emissions, and reducing the unit costs of transport.

7. Appendice

7. Appendix

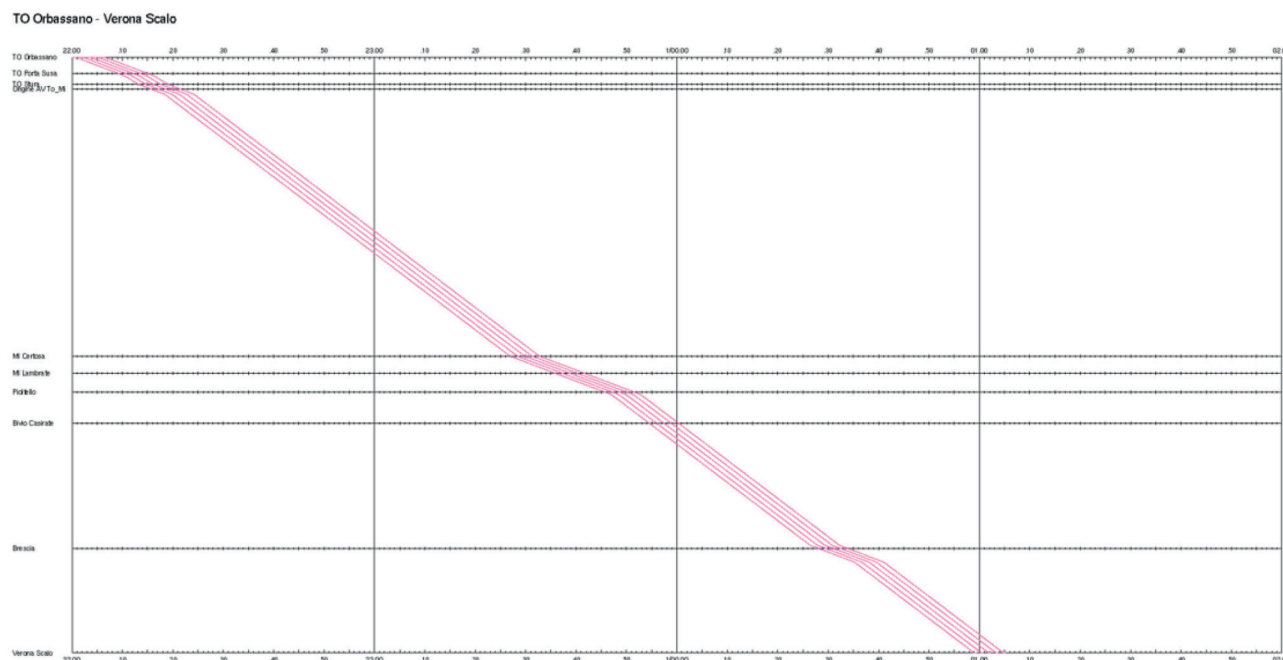


Figura 7 – 120 km/h.
Figure 7 – 120 km/h.

TO Orbassano - Verona Scalo

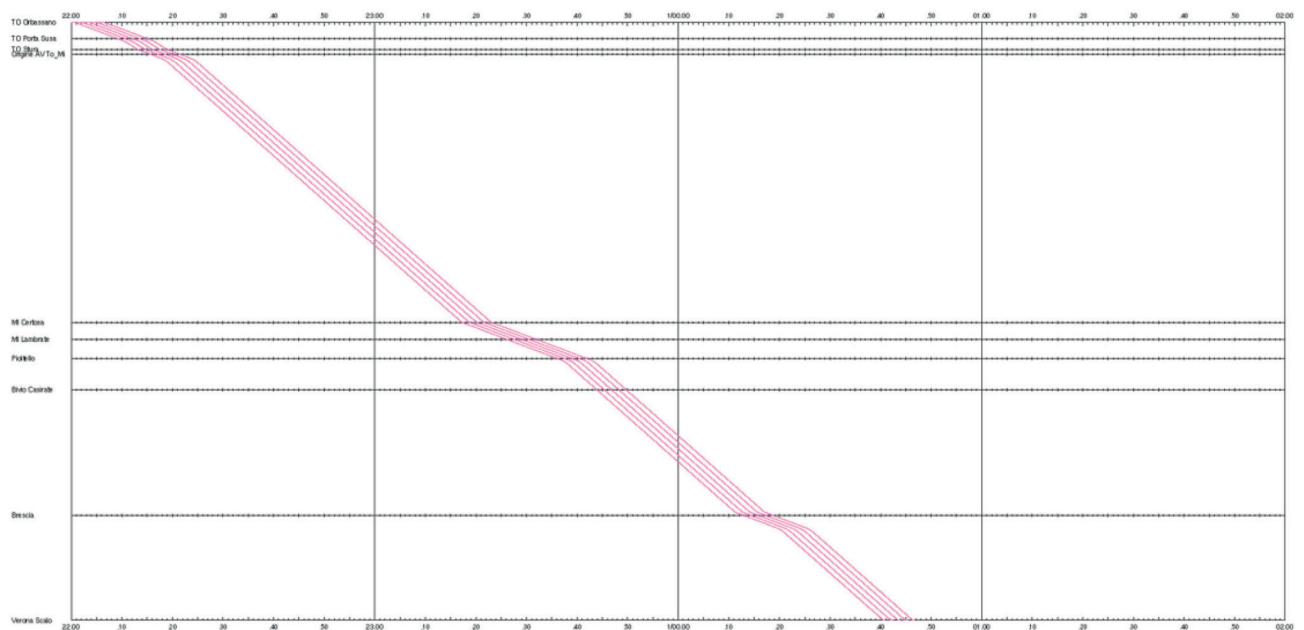


Figura 8 – 140 km/h.
Figure 8 – 140 km/h.

TO Orbassano - Verona Scalo

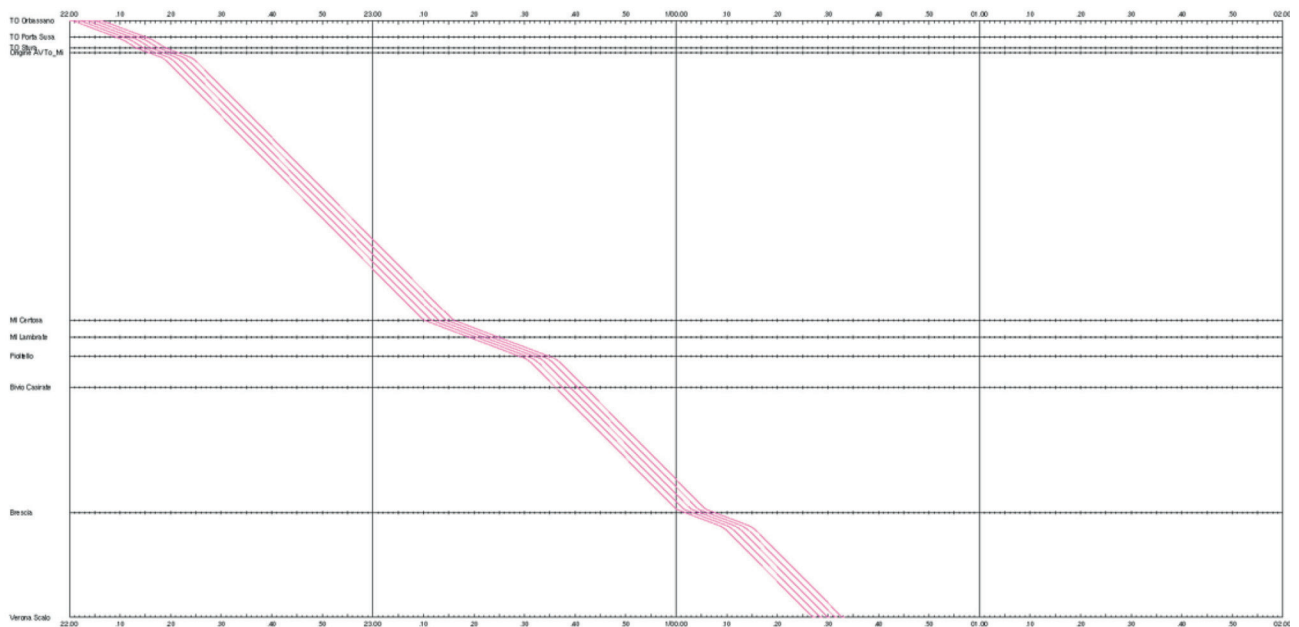


Figura 9 – 160 km/h.
Figure 9 – 160 km/h.

BIBLIOGRAFIA - REFERENCES

- [1] EUROSTAT - Statistics explained, *"Freight transport statistics - modal split"* Eurostat, Luxembourg, 2022.
- [2] CER (2017), *"The Voice of European Railways"* CER, [Online]. Available: <http://www.cer.be/topics/freight>. [Consultato il giorno 15 11 2022].
- [3] International transport forum (2022), *"Mode Choice in freight transport"* OECD Publishing, Paris.
- [4] DALLA CHIARA B. (2021), *"Ricollocazione della piattaforma logistica di Torino-Orbassano nella rete intermodale europea con funzione gateway"*, Politiche Piemonte, vol. Trasporti e mobilità, n. 67, pp. 15-22.
- [5] LUPI M., CONTE D., MANGIAVACCHI S., SECONDULFO A., SEMINARA L., FARINA A., (2023), *"An analysis of the competitiveness of the new Turin-Lyon railway line"*, Ingegneria Ferroviaria, vol. 1, pp. 31-71, Gennaio.
- [6] DALLA CHIARA B., DE FRANCO D., COVIELLO N., PASTRONE D. (2017), *"Comparative specific energy consumption between air transport and high-speed rail transport: A practical assessment"* Transportation Research Part D: Transport and Environment, vol. 52, pp. 227-243.
- [7] European Commission, Directorate (2011), General for Mobility and Transport, *"White paper on transport: roadmap to a single European transport area - towards a competitive and resource efficient transport system"*, Publication Office.
- [8] European Commission (2019), *"The European Green Deal"*, Brussels, 2019.
- [9] DICK C., ATANASSOV I., KIPPEN F., MUSSANOV D. (2019), *"Relative train length and the infrastructure required to mitigate delays from operating combinations of normal and over-length freight trains on single-track railway lines in North America"*, in Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit.
- [10] ISLAM D., JACKSON R., ZUNDER T., BURGESS A. (2015), *"Assessing the impact of the 2011 EU Transport White Paper - a rail freight demand forecast up to 2050 for the EU27"*, European Transport Research Review, vol. 7.
- [11] GUALCO A., COVIELLO N., DALLA CHIARA B. (2021), *"Functional design of distributed-power freight trains: Simulation of operation on the Turin-Savona railway line"*, Ingegneria Ferroviaria, vol. 76, pp. 257-287.
- [12] CARBONI A., BONI G., DALLA CHIARA B. (2022), *"Long and heavy freight trains in operation: analysis of the strength of couplings and test evidences on thermal effects during braking"*, Ingegneria Ferroviaria, vol. 1, pp. 23-40.
- [13] FLAMMINI F., MARRONE S., NARDONE R., PETRILLO A., SANTINI S., VITTORINI V. (2018), *"Towards Railway Virtual Coupling"* in 2018 IEEE International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles & International Transportation Electrification Conference (ESARS-ITEC), Nottingham, UK.
- [14] BOEHM M., ARNZ M., WINTER J. (2021), *"The potential of high-speed rail freight in Europe: how is a modal shift from road to rail possible for low-density high value cargo?"* European Transport Research Review, vol. 13.
- [15] FRANCISCO F., TEIXEIRA P., TOUBOL A., NELLDAL B. (2021), *"Is large technological investment really a solution for a major shift to rail? A discussion based on a Mediterranean freight corridor case-study"*, Journal of Rail Transport Planning & Management, vol. 19.
- [16] ZUNDER T., ISLAM D. (2018), *"Assessment of existing and future rail freight services and Technologies for low Density High Value Goods in Europe"*, European Transport Research Review, vol. 10, n. 9, 19 12 2017.
- [17] GURRÌ S., BOCCIERI M., GALASSO D., OPERTI V., DALLA CHIARA B. (2022), *"Simulating the operation of a new generation freight-EMU for high-speed lines: perspectives for a more reliable, sustainable and fast logistics"*, in Proceedings of The Fifth International Conference on Railway Technology: Research, Development and Maintenance, Montpellier.
- [18] ABRIL M., BARBER F., INGOLOTTI L., SALIDO M.A., TORMOS P., LOVA A. (2008), *"An assessment of railway capacity"*, Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, vol. 44, n. 5, pp. 774-806.
- [19] ROTOLI F., CAWOOD E.N., SORIA A. (2016), *"Capacity assessment of railway infrastructure: Tools, methodologies and policy relevance in the EU context (No. JRC100509)"* Joint Research Centre, Seville, Spain, 2016.
- [20] Union Internationale des Chemins de Fer (1983), *UIC 405*.
- [21] Union Internationale des Chemins de Fer (2004), *UIC code 406 – Capacity*.
- [22] GIBSON S., COOPER G., BALL B. (2002), *"Developments in transport policy: The evolution of capacity charges on the UK rail network"*, Journal of Transport Economics and Policy (JTEP), vol. 36, n. 2, pp. 341-354.
- [23] DINGLER M.H., LAI Y.-C. E BARKAN C.P. (2009), *"Impact of train type heterogeneity on single-track railway capacity."* Transportation Research Record, vol. 2117, n. 1, pp. 41-49.

- [24] LAI Y.C. E BARKAN C.P. (2011), "Comprehensive decision support framework for strategic railway capacity planning," *Journal of Transportation Engineering*, vol. 137, n. 10, pp. 738-749.
- [25] MUSSONE L., CALVO R.W. (2013), "An analytical approach to calculate the capacity of a railway system," *European Journal of Operational Research*, vol. 228, n. 1, pp. 11-23
- [26] LIAO Z., LI H., MIAO J., CORMAN F. (2021), "Railway capacity estimation considering vehicle circulation: Integrated timetable and vehicles scheduling on hybrid time-space networks" *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 124.
- [27] DICEMBRE A., RICCI S. (2011), "Railway traffic on high density urban corridors: Capacity, signalling and timetable" *Journal of Rail Transport Planning & Management*, vol. 1, n. 2, pp. 59-68.
- [28] GOVERDE R.M., CORMAN F., D'ARIANO A. (2013), "Railway line capacity consumption of different railway signalling systems under scheduled and disturbed conditions" *Journal of rail transport planning & management*, vol. 3, n. 3, pp. 78-94.
- [29] COVIELLO C., DALLA CHIARA B. (2016), "Availability of paths for fast freight services on an Italian high speed railway" in *11th World Congress on Railway Research*, Milan.
- [30] WATSON I., ALI A., BAYYATI A. (2019), "Freight transport using high-speed railways" *International Journal of Transport Development and Integration*, vol. 3, n. 2, pp. 103-116.
- [31] CAVAGNARO M. (2014), "A freight project for the European Railway network" *Ingegneria Ferroviaria*, vol. 10, p. 825.
- [32] STOILOVA S., MUNIER N., KENDRA M., SKRÚCANÝ T. (2020), "Multi-Criteria Evaluation of Railway Network Performance in Countries of the TEN-T Orient-East Med Corridor" *Sustainability*, vol. 12, n. 4, p. 1482.
- [33] RANJBAR V., OLSSON N.O. (2020), "Towards mobile and intelligent railway transport: a review of recent ERTMS related research" *Computers in Railways*, vol. 14, pp. 65-73.
- [34] DEUTSCH P. (2022), "Overview ERTMS/ETCS Baseline 3 and Beyond." *Operating Rules and Interoperability in Trans-National High-Speed Rail*.
- [35] CEI EN 50238-1 (CEI 9-79), "Applicazioni ferroviarie, tranviarie, filoviarie e metropolitane – Compatibilità tra il materiale rotabile ed i sistemi di rilevamento di treni", 2020.
- [36] ANSF (2008), "Norme per l'esercizio delle linee AV/AC attrezzate con ERTMS/ETCS livello 2 senza segnali fissi luminosi".
- [37] GENOVESI P., RONZINO C. (2006), "Flussi e capacità delle linee ferroviarie a doppio binario" *Ingegneria Ferroviaria*.
- [38] LANDEX A., JENSEN L., "Infrastructure Capacity in the ERTMS Signaling System," in *RailNorrköping 2019, 8th International Conference on Railway Operations Modelling and Analysis (ICROMA)*, Norrköping, Sweden, 2019.
- [39] HOANG T.S., BUTLER M., REICHL K. (2018), "The Hybrid ERTMS/ETCS Level 3 Case Study" in *International Conference on Abstract State Machines, Alloy, B, TLA, VDM and Z*.
- [40] BASILE D. et al. (2018), "On the Industrial Uptake of Formal Methods in the Railway Domain" in *International Conference on Integrated Formal Methods*, Maynooth, Ireland.
- [41] BEUGIN J., LEGRAND C., MARAIS J., BERBINEAU M., EL-KOURSI E.M. (2018), "Safety appraisal of GNSS-based localization systems used in train spacing control" *IEEE Access*, vol. 6, pp. 9898-9916.
- [42] NERI A., STALLO C., COLUCCIA A., PALMA V., SALVATORI P., VENNARINI A., POZZOBON O., GAMBA G., FANTINATO S., BARBUTO M., MONTI A., BILOTTI F., TOSCANO A., RISPOLI F., CIAFFI M. (2017), "An Anti-jamming and Anti-spoofing Digital Beamforming Platform for the GNSS-based ERTMS Train Control System" in *Proceedings of the 30th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS+ 2017)*, Portland, Oregon, 2017.
- [43] ETH Zurich Institute for Transport Planning and Systems (2023), *OpenTrack - Simulation of Railway Networks*.
- [44] CER Community of European Railway and Infrastructure Companies (2013-2014), "Annual Report" Brussels.
- [45] ISLAM D., RICCI S., NELLDAL B. (2016), "How to make modal shift from road to rail possible in the European transport market, as aspired to in the EU Transport White Paper 2011" *European Transport Research Review*, vol. 8.
- [46] Aachen University (2008), "Influence of ETCS on line capacity - Generic Study" UIC.