



Requisiti progettuali di treni merci a potenza distribuita: simulazione d'esercizio sulla linea Torino-Savona

Functional design of distributed-power freight trains: simulation of operation on the Turin-Savona railway line

Alberto GUALCO ^(*)
Nicola COVIELLO ^(*)
Bruno DALLA CHIARA ^(*)

Sommario – L'articolo approfondisce gli aspetti ingegneristici ed i potenziali vantaggi correlati alla progettazione ed esercizio di treni merci a potenza distribuita (F-EMU, *freight - Electric Multiple Unit*), valutando le diverse componenti di un nuovo genere di convoglio e confrontandone le prestazioni con un treno merci tradizionale.

I motori elettrici, disposti su alcuni carrelli motorizzati dei carri in composizione, permettono peraltro di fornire quelle potenze necessarie per evitare composizioni multiple ed accedere con livelli di velocità interessanti (140-160 km/h) alle linee ad alta velocità, progettate e realizzate a suo tempo – ad esempio in Italia – per uso promiscuo, fatti salvi altri requisiti del materiale rotabile indicati nell'articolo.

I treni EMU sono notoriamente impiegati per servizi passeggeri in quanto consentono di raggiungere alte velocità, recuperare energia in fase di frenatura ed incrementare in generale le prestazioni del materiale rotabile.

L'analisi del moto per i treni merci evidenzia che, in fase di trazione, elevati valori di accelerazione possono essere raggiunti dai treni a potenza distribuita grazie ad una migliore distribuzione del peso aderente. Relativamente alla fase di frenatura, alte prestazioni sono ottenibili mediante l'adozione della frenatura elettrodinamica, con recupero energetico, in aggiunta all'impianto frenante elettropneumatico principale: questo permette anche di non allungare sezioni di blocco a cura del gestore dell'infrastruttura nel passaggio a treni da 700-750 m. L'impiego di tali convogli merci innovativi soddisfa anche le esigenze moderne del trasporto intermodale: l'elettificazione dell'intero convoglio rende possibile il trasporto di unità di trasporto refrigerate, di merce deperibile ed un costante monitoraggio del carico.

Summary – This paper presents an in-depth investigation of the engineering aspects related to the design and operation of distributed-power freight trains (F-EMU, *freight - Electric Multiple Unit*), and their potential advantages, by evaluating the various components of this new kind of train and comparing its performance with a traditional freight train.

Electric motors, distributed along certain motorised carriages of connected wagons, allow, among others, the power necessary to avoid multiple locomotives, used on traditional lines for the heaviest trains, to be supplied, and access to high-speed lines, which were originally designed and constructed – in Italy for example – for mixed use (i.e. for passengers and freight). Interesting speed levels (140-160 km/h) could be achieved, subject to the other requirements of the rolling stock, which are indicated later on in the paper.

EMU trains are known to be used for passenger services, as they allow high speeds to be reached, energy to be recuperated during braking and, in general, increases in the performances of the rolling stock to be obtained.

Analyses of the operation of freight trains have pointed out that distributed-power trains are able to reach appreciable acceleration values, during traction, because of a better distribution of the adhesive weight. High performances can be achieved, during the braking phase, when electro-dynamic braking, which allows energy to be recovered, is adopted together with a dominant electro-pneumatic braking system: this also prevents the infrastructure operator from having to lengthen the block sections to allow any poorly-braking 700-750 m long traditional trains to transit. The use of such innovative freight trains also satisfies the modern requirements of intermodal transport: electrification of the whole train makes it possible to transport

^(*) Politecnico di Torino, Dip. DIATI – Trasporti.

^(*) Politecnico di Torino, Dept. DIATI – Transport systems.

Dopo aver approfondito i requisiti progettuali e funzionali del convoglio F-EMU, si effettua un confronto tra le prestazioni di un convoglio merci a potenza distribuita e di un treno merci tradizionale sulla linea di valico Torino-Savona mediante un software di micro-simulazione in grado di riprodurre l'esercizio ferroviario sulla tratta e saturare l'attuale orario passeggeri con treni merci.

Dai risultati emerge che l'adozione di treni merci a potenza distribuita conduce ad una sensibile riduzione dei tempi di percorrenza ed un incremento delle unità di trasporto intermodali (UTI) trasportabili nell'arco temporale di riferimento, specialmente utilizzando convogli con lunghezza 750 m.

1. Premessa

Nell'offerta di trasporto della seconda metà del Novecento, quella delle merci – tranne alcune eccezioni – è sovente rimasta inalterata: carri in solo acciaio, come quelli di circa 70 anni fa, molti dei quali in circolazione con 30-40 anni di esercizio cumulato.

Al fine di rendere il trasporto ferroviario delle merci più competitivo ed attraente, come reiteratamente auspicato anche in vista del 2030, con degli obiettivi che l'Unione Europea si prefigge di raggiungere (Libro bianco del 2011), risulta necessario sì intervenire ed investire sull'infrastruttura ferroviaria ma anche necessariamente sul materiale rotabile, altrimenti non ci si può attendere né d'acquisire quote di mercato oggi escluse dal trasporto ferroviario, né che i treni merci esistenti viaggino di regola su linee ad alta velocità, se non come adattamenti di treni passeggeri, quindi di fatto con servizi specifici: si tratta dell'unica alternativa seria per incrementare il traffico ferroviario delle merci, che dovrebbe riguardare in primo piano i corridoi intermodali della rete trans-europea di trasporto (TEN-T) [1] [2] nonché i principali porti marittimi ad essi collegati.

Tali interventi, mirati all'incremento dei carichi utili trasportabili da ciascun convoglio, alla possibilità d'effettuare una diagnostica in remoto sia di merci sia di componenti del materiale rotabile, alla possibilità di non precludere a monte grosse quantità di merci (specie se deperibili e/o necessitanti refrigerazione, come farmaci o derrate alimentari) ed alla riduzione dei tempi di percorrenza possono permettere di gestire gli aumenti di domanda previsti in alcuni nodi della rete.

Si ricorda peraltro che nei trasporti, come in altri settori, la capacità di attrarre domanda è funzione dell'offerta ed un'offerta non competitiva o non al passo con i tempi, evitando senz'altro gli sprechi, perde di attrattività e mercato.

Le operazioni di costruzione, adeguamento e miglioramento delle infrastrutture avallate dal gestore dell'infrastruttura ferroviaria devono pertanto procedere di pari passo con l'evoluzione tecnologica del materiale rotabile.

units of refrigerated goods and perishable goods, and to conduct a constant monitoring of the load.

After having examined the design and functional requirements of the F-EMU train and a traditional one, a comparison is made of the performances of a distributed-power freight train and a conventional one, on the Turin-Savona railway line, through the use of a micro-simulating software package that is able to reproduce the railway operations along the considered stretch and saturate the current passenger timetable with freight trains.

From the results, it has emerged that the adoption of distributed-power freight trains leads to a marked reduction of the travel times and an increase in the intermodal transport units (UTI) that can be transported over the reference time frame, especially when considering the use of 750 m long trains.

1. Introduction

The rail transport offer, pertaining to goods, has basically remained unchanged – apart from just a few exceptions – since the second half of the twentieth century: wagons are still only made of steel, like those of 70 years ago, many of which have been in continuous operation for 30-40 years.

In order to make rail transport more competitive and more attractive – as repeatedly requested, in part in view of the objectives that the European Union hopes to achieve by 2030 (White Paper on Transport, 2011), it will be necessary to intervene and invest in the railway infrastructure but also in the rolling stock, otherwise it will not be possible to expect or acquire a market share that is today excluded from rail transport. Moreover, it will not be possible for the existing freight trains to travel in a routine manner on high-speed lines, unless as adaptations of passenger trains, that is, with the addition of specific services. This is in fact the only serious alternative that can be considered to increase the rail traffic of goods, and it should first and foremost concern the intermodal corridors of the trans-European transport network (TEN-T) [1] [2], but also the main sea ports connected to such an infrastructure.

Such interventions are aimed at increasing the transportable load capacity of each train, and allow for a number of outcomes: the possibility of carrying out remote diagnostics on both the goods and on the rolling stock; the possibility of not excluding large quantities of goods (especially if they are perishable and/or require refrigeration, such as medicines or foodstuffs); a reduction of the travel times. This may make it possible to manage the increases in demand foreseen for some nodes in the rail network.

Moreover, it should be recalled that the capacity to attract demand in the transport sector, as in other sectors, is a function of the offer, and a non-competitive offer or one which is not in line with the times, although doubtlessly avoiding waste, would miss out on attractiveness and on the market.

Attraverso un'analisi accurata del parco dei carri merci attuale, nonché di studi e ricerche su materiale rotabile innovativo emerge l'assenza di documenti approfonditi e completi riguardanti treni merci a potenza distribuita. Peraltro la ricerca in materia è modesta proprio a causa di una penuria di attenzione ed investimenti sui treni merci per decenni.

S'intende perciò fornire con il presente elaborato una disamina sul tema, domandandosi criticamente al contempo se tale scelta da parte dei costruttori sia auspicabile, nonché quali siano i vantaggi tecnologici e funzionali derivanti da un'eventuale adozione.

Il tema della progettazione di un convoglio prototipo merci a potenza distribuita risulta complesso ed articolato dovendo interfacciarsi con ambiti eterogenei, tra i quali la componentistica meccanica, la dinamica del moto, la tecnica ed esercizio del trasporto ferroviario, la logistica, la diagnostica ed analisi energetiche.

L'obiettivo finale è valutare i vantaggi, tecnologici e funzionali, derivanti dall'utilizzo di elettrotreni merci, studiandone la variabilità rispetto ad alcuni fattori di seguito indicati.

2. Impostazione dello studio

Le tematiche trattate nella prima parte dell'articolo, in merito alla progettazione di un nuovo convoglio merci, sono frutto di un'analisi macroscopica e qualitativa riguardante le componenti che costituiscono il materiale rotabile, al fine d'indagare su dimensionamento generale e caratteristiche delle stesse, approfondendo le soluzioni tecnologiche ed innovative proposte dal mercato al fine d'incrementare prestazioni, attrattività e versatilità d'impiego dei treni.

Sulla base dello stato dell'arte, nonché di ricerche eseguite sul materiale rotabile merci ad oggi esistente, sono state definite aree di studio riguardanti componenti ed impianti del treno da approfondire e dimensionare in via preliminare ai fini di un assemblaggio realistico, tra le quali le modalità di composizione del convoglio, il tipo di carri, i motori di trazione, l'impianto frenante, la flessibilità d'esercizio. Ne risulta la definizione delle grandezze aggregate necessarie ad inquadrare un "concept funzionale" di un convoglio merci a potenza distribuita, utile al fine di effettuare le simulazioni d'esercizio.

Poiché la composizione dei convogli dipende in modo rilevante dalla planimetria ed altimetria del tracciato, è stata eseguita contestualmente un'analisi delle caratteristiche della linea Torino-Savona, sulla quale verranno analizzate le prestazioni di diverso materiale rotabile, tradizionale e non. La scelta di una ferrovia tradizionale e non ad alta velocità consegue dalla necessità di disporre di una linea con margini di traffico addizionale ed avente al contempo – sulle estremità del percorso – dei bacini di generazione ed attrazione di traffico merci non marginali, tanto da giustificare un servizio; la scelta è comunque

The construction, maintenance and technological improvement of the infrastructures, endorsed by the manager of the railway infrastructure, should therefore proceed hand in hand with the technological evolution of the rolling stock.

Through an accurate analysis of the current freight wagon fleet, as well as studies and research on innovative rolling stock, it has emerged that there is a lack of detailed and complete documentation concerning distributed-power freight trains. The research on the subject is therefore of modest extent, because of a lack of attention to and investments in freight trains, a situation that has lasted for decades.

It is therefore the aim of the present document to furnish an examination of the theme, and at the same time to ask critically whether such a choice, made by the constructors, is desirable, but also to establish what the technological and functional advantages of such an adoption would be.

The engineering and design of a prototype of a distributed-power freight train is a complex and articulated process, as it is necessary to interface heterogeneous sectors, such as mechanical components, the dynamics of motion, the technology and operation of rail transport, logistics, as well as energy diagnosis and analysis.

The final objective of this work is to evaluate the technological and functional advantages that may be derived from the use of fully electric freight trains, through the study of the variability of such trains with respect to some factors that are indicated hereafter.

2. The study design

The themes dealt with in the first part of the paper, concerning the engineering and design of a new freight train, are the result of a macroscopic and qualitative analysis of the construction of the components of the rolling stock, which was conducted in order to investigate its dimensions and characteristics, through a detailed examination of the technological and innovative solutions on the market, in order to increase the performances, attractiveness and versatility of the trains.

The areas of study, regarding a preliminary detailed investigation and dimensioning of the components and subsystems of the train, were defined on the basis of the state of the art and research conducted on existing freight rolling stock, among which the composition of the train, the type of carriages, the traction motors, the braking system and operational flexibility, in order to attain a realistic assembly. As a result, a "functional concept" of a freight EMU is outlined, in order to perform operational simulations.

As the composition of trains depends to a great extent on the track layout of the considered rail network, an analysis of the characteristics of the Turin-Savona railway line was carried out in order to conduct analyses of the performances of different traditional and non-traditional rolling stock. The choice of a traditional railway, and not of a

prudenziale anche ai fini d'una possibile attuazione futura, fermo restando che sulle linee ad alta velocità un servizio merci non potrà che cominciare, nel caso, con una domanda debole, con tariffe per l'uso dell'infrastruttura meno onerose rispetto al trasporto passeggeri, e temporaneamente allocata nelle fasce della tarda sera o notturne al di fuori di quelle esclusive per la manutenzione, con servizi omotachici (140-160 km/h).

Le composizioni del treno merci tradizionale e del convoglio merci a potenza distribuita dovranno essere tali da rispettare le condizioni di ammissibilità alla circolazione sulla tratta suddetta. Per questo motivo, nella definizione del numero e del tipo di carri e locomotori, dell'entità del carico massimo trasportabile, della lunghezza e della massima massa rimorchiata, è necessario interfacciarsi con i documenti forniti dal gestore dell'infrastruttura, per rispettarne i vincoli.

Si procede eseguendo un confronto, considerando dapprima l'aspetto dinamico, valutando le decelerazioni ed accelerazioni medie di tali convogli per raggiungere la velocità di regime, anche al variare del carico trasportato; in seguito, valutando l'aspetto logistico e funzionale, si simula l'esercizio del convoglio sulla tratta prescelta anche al fine d'incrementare le unità trasportabili.

I treni lunghi con elettrificazione lungo il convoglio, in virtù della possibilità di ampliare fortemente il bacino di merci acquisibili – perché molte oggi richiedono controllo termico o di altre variabili fisico chimiche pur non ricadendo nelle deperibili – permettono evidentemente la riduzione dei costi unitari di trasporto: semplificando, di 35/20 (o ridotti a 0.57), se si considera il rapporto tra i carri sui quali i costi vengono distribuiti.

L'UIC (International Union of Railways / Union Internationale des Chemins de Fer) nel 2014 in "Requirements of Railway Undertakings for the Implementation of European Rail Freight Corridor" dichiarava: "740 m train length (with locomotive/s) should be the minimum length. Longer trains raise RUs' profitability at low cost for the IMs, as highlighted by a recent RFC1 study on this subject" [Prepared by UIC on the basis of report by Interfleet Technology of 19 December for UIC, ISBN: 978-2-7461-2248-2, January 2014]. Quindi già tale studio affronta (2014) il tema dei costi e benefici dei treni lunghi, da 35 carri; tuttavia non è questo il punto in questo articolo, bensì valutare se effettivamente essi consentano la compatibilità infrastrutturale con le linee attuali e le ricadute attese in termini di esercizio.

Volendo eseguire uno studio multi-variabile sulle grandezze che influiscono sulla composizione di convogli prototipo si definiscono diversi scenari, al fine di stabilire l'effettiva influenza delle diverse variabili di controllo sui risultati.

L'esercizio ferroviario è stato simulato mediante il pacchetto di calcolo SASTRE (Simulazione ed Analisi Sistemi di Trasporto su Rotaie) del Politecnico di Torino: inserendo l'insieme degli elementi topologici dell'infra-

high-speed one, arose from the necessity of having a line with additional traffic margins available and, at the same time, of generation and attraction basins of non-marginal freight traffic at the end of the stretch (i.e. a port and a freight village associated with an industrial area), in order to justify such a service. However, such a choice can be considered conservative, as the aim has been that of obtaining a possible future activation of this kind of service: this is subject to the fact that a freight service can only begin on high-speed lines with a weak demand, provided that less costly charges for the use of the infrastructure than for passenger transport are applied, and time-slots are allocated in the late evening or nocturnal hours, outside those used exclusively for maintenance, with homogenous services, in terms of allowed speed (140-160 km/h).

The compositions of the traditional freight train and of the distributed-power freight train should be such that they respect the admissible circulation conditions on the aforementioned test-stretch. For this reason, it has been necessary to access the documents supplied by the infrastructure manager in order to respect the constraints for the definition of the number and type of wagons and locomotives, of the entity of the maximum transportable load, of the length of the train and of the maximum towed mass.

A comparison was carried out by first considering the dynamic aspect, that is, by evaluating the mean deceleration and acceleration of such trains to obtain the cruising speed, considering variations in the transported load. The logistic and functional aspects were then evaluated by simulating the operation of the train on the chosen stretch, in part to increase the transportable units.

The long trains with electrification along the convoy, by virtue of the possibility of greatly expanding the basin of acquirable goods – because many of them require nowadays thermal control or monitoring other physical-chemical variables, even though they are not perishable – clearly allow the reduction of unit costs of transport: simplifying, of 35/20 (or reduced to 0.57), if we consider the ratio between the wagons on which the costs are distributed.

The UIC in 2014 in "Requirements of Railway Undertakings for the Implementation of European Rail Freight Corridor" stated: "740 m train length (with locomotive/s) should be the minimum length. Longer trains raise RUs' profitability at low cost for the IMs, as highlighted by a recent RFC1 study on this subject" [Prepared by UIC on the basis of report by Interfleet Technology of 19 December for UIC, ISBN: 978-2-7461-2248-2, January 2014]. So already that study addresses (2014) the issue of costs and benefits of long trains, from 35 wagons; however, this is not the point in this article, but to assess whether they actually allow infrastructural compatibility with current lines and the expected fallout in terms of operation.

As the aim was to conduct a multi-variable study on the magnitudes that affect the composition of the prototype train, different scenarios were defined in order to establish the real effect of the different control variables on the results.

struttura, le caratteristiche elettro-meccaniche del materiale rotabile ed un orario di partenza, in tal caso quello per i viaggiatori, lo strumento di simulazione consente di colmare tale orario con tracce merci mediante un algoritmo di saturazione.

L'analisi dei risultati viene effettuata sulla base dei tempi di percorrenza della tratta e delle tonnellate trasportabili nella fascia oraria 04:00:00-24:00:00.

3. Limiti del materiale rotabile esistente per trasporto merci

Le tipologie di carri merci attualmente utilizzate sono correlate alla natura merceologica trasportata, che permette di suddividerli in carri coperti, a sponde alte, a pianale, serbatoio, a tetto apribile, speciali, refrigerati. A parte tale ultima categoria, si tratta di carri non adatti alla merce deperibile, merce che è andata assumendo quote di mercato via via più ampie dagli anni '60 in poi, relegando il trasporto ferroviario alle tipologie di merci che già raccoglieva all'epoca delle grandi costruzioni, merci tuttavia da decenni non più così dominanti – in termini di traffici – come all'epoca.

Da alcuni anni, inoltre, s'intende prediligere – a meno di alcune merci particolari – la logica del trasporto intermodale [3] [4], che facilita evidentemente il trasferimento delle relative unità di trasporto tra ogni coppia di vettori o modi di trasporto utilizzati ed evita il ricorso, lungo e non sempre efficiente, alle selle di lancio quando occorre uno smistamento treno-treno [5] [6].

È quindi innanzitutto necessario che i veicoli ferroviari siano consoni all'intermodalità, che notoriamente risulta avere grandi potenzialità rispetto al traffico diffuso tradizionale, in termini di flessibilità, interoperabilità ed economicità d'esercizio, grazie in sostanza alla possibilità d'evitare le operazioni di rottura di carico, di trasbordo della merce, ed alla possibilità di accoppiare le funzioni di trasferimento modale strada-rotaia e di trasbordo treno-treno nello stesso terminal.

È perciò essenziale, nell'eventuale progettazione o sistemazione (*revamping*) dei veicoli e per rendere il trasporto ferroviario una soluzione appetibile sul mercato, intervenire sulle prestazioni e sui perditempo associati ad operazioni di logistica.

Il parco attuale dei carri merci risulta antiquato e superato non solo da un punto di vista funzionale ma anche ingegneristico; lo dimostrano sia i periodi di costruzione della maggioranza dei carri in circolazione, compresi tra gli anni '50 e gli anni '90 [7] [8], sia il fatto che le quote del mercato delle spedizioni ai quali la ferrovia può potenzialmente attingere sono limitate dalle caratteristiche dei convogli medesimi, come oltre specificato.

Inoltre, la circolazione delle merci su ferrovia, al fine di garantire la sicurezza dell'esercizio, deve rispettare precise regole e condizioni che possono limitare, special-

Rail operation was simulated using the Politecnico di Torino's SASTRE ("Simulazione ed Analisi Sistemi di Trasporto su Rotaie" – Simulation and Analysis of Transport Systems operating on Rails) simulation package: if the set of topological elements of an infrastructure, the electro-mechanical characteristics of the rolling stock and the departure timetable, in this case for the passengers, are inserted, the calculation tool allows such a timetable to be filled with freight paths through the use of a saturation algorithm.

The analysis of the results was carried out on the basis of the travel times along the stretch and of the transportable tonnes in the 04:00:00-24:00:00 time window.

3. Limits of the existing rolling stock for freight transport

The types of freight wagons used at present are correlated with the nature of the transported goods, and they can be divided as follows: covered wagons, platform wagons, tank wagons, with high sides, with removable covers, special and refrigerating wagons. Apart from the latter category, all these types are unsuitable for the transport of perishable goods, which have been taking on a greater and greater market share, from the 1960's onwards, thus relegating railway transport to the types of goods that were already transported at the time of the construction boom, but which, in traffic terms, have not been so dominant for decades as in the past.

Moreover, for some years, there has been a tendency to prefer the logic of intermodal transport – albeit not for some particular goods [3] [4]. Such a logic obviously facilitates the transfer of the relative transport units between each couple of vectors or used transport modalities, and avoids the need of resorting to marshalling yards when a train-to-train shunting is required, which may be long and is not always efficient [5] [6].

It is therefore first and foremost necessary for the railway vehicles to be suitable for intermodal transport, which is known to offer greater potentialities than the traditional wagon-load traffic (known also as single wagon or widespread rail traffic), in terms of operating flexibility, interoperability and cost-effectiveness, basically thanks to the possibility of avoiding the necessity of deconsolidating the cargo and of handling goods, as well as the possibility of coupling the road-rail modal transfer function with that of the train to train shifting function in the same terminal.

It will therefore be essential, should the vehicles be re-designed and revamped to render rail transport an interesting solution, to intervene on the performances and on the time losses associated with logistic operations.

The current fleet of freight wagons results to be outdated and surpassed, not only from a functional point of view, but also from the engineering one; this can be seen by considering both the period of construction of most of the wagons in operation, including those made between the 1950's

mente per carri antiquati, le velocità di esercizio e il carico ammissibile.

Le merci caricate devono rispettare i limiti di sagoma e il limite di carico di ciascun carro; quest'ultimo considererà la categoria delle linee percorse ed il regime di velocità utilizzato. La Prefazione Generale dell'Orario di Servizio (P.G.O.S.) [9] in Italia o documenti analoghi sulle reti di altre Amministrazioni Ferroviarie stabiliscono notoriamente il regime di velocità, come la massima velocità ammissibile per i carri, in relazione alle caratteristiche costruttive ed alle loro condizioni di carico.

Per promemoria, i regimi di velocità ed i rispettivi limiti sono in Italia:

- ordinario, fino a 90 km/h;
- [S], fino a 100 km/h;
- [SS], fino a 120 km/h.

Per i modelli di carri merci più performanti in circolazione la velocità massima raggiungibile è dunque di 120 km/h. I dati relativi alla categoria della linea e al regime di velocità confluiscono in tabelle riportate direttamente sulle pareti dei carri chiusi o sui longheroni dei carri a pianale. Il limite di carico da osservare è quello corrispondente alla categoria più bassa delle linee da percorrere ad al regime di velocità del trasporto. In Tab. 1 viene mostrato un esempio di iscrizione di limite di carico presente su un carro.

Le prestazioni di trazione dei convogli merci tradizionali dipendono esclusivamente da tipo e numero di locomotori utilizzati, da cui discendono il peso aderente e lo sforzo di trazione.

A tal riguardo, s'intende precisare che nel presente studio sono stati trascurati i vincoli di potenza assorbita imposti dalle linee: si assume infatti che sarà compito del gestore dell'infrastruttura adeguare le potenze degli impianti elettrici in funzione di quelle assorbite da eventuali convogli-prototipi se appetibili per nuovi mercati.

Sulle linee con livellette significative ($\geq 25-30\%$) la massa rimorchiata, quindi indirettamente anche la lunghezza del treno, risulta generalmente limitata dai massimi sforzi verificabili sui ganci di trazione, come imposto dalla P.G.O.S. e come è stato verificato mediante un'analisi di corpo rigido.

Tabella 1 – Table 1

Esempio di iscrizione di limite di carico presente su un carro

An example of the inscription of the load limits on a wagon

	A	B	C
90	18 t	22 t	26 t
S	18 t	22 t	

and 1990's [7], [8], and the fact that the market share of the shipments the railway can tap into is limited, as a result of the characteristics of the trains themselves, as specified elsewhere.

Moreover, the circulation of goods by rail should respect precise rules and conditions, in order to guarantee safety of the operations, which may limit the speeds and the load capacity, especially for the most outdated wagons.

The loaded goods should respect the limits of size and mass of each wagon; the latter should consider the categories of the travelled lines and the adopted speed regimes. The Italian "Prefazione Generale dell'Orario di Servizio" (P.G.O.S.) (General Introduction of the Operation Timetable) [9], and similar documents on the networks of other Railway Administrations, generally establish the speed regimes, such as the maximum speed for the wagons, in relation to the construction characteristics and their load conditions.

As a reminder, the speed regimes and the respective limits in Italy are:

- regular, up to 90 km/h;
- [S], up to 100 km/h;
- [SS], up to 120 km/h.

However, the maximum speed that can be reached for the most efficient freight train models in circulation is 120 km/h. The data relative to the line categories and to the speed regimes are gathered together in the tables reported directly on the walls of the closed wagons or on the crossbeams of the platform wagons. The load limit that should be taken into consideration is that corresponding to the lowest category of the line that has to be travelled and to the speed regime of the transport. An example of the inscription of the load limits on a wagon is shown in Tab. 1.

The traction performances of traditional freight trains depend only on the type and number of locomotives that are used, from which the related weight and the traction power are derived.

In this respect, it should be clarified that the power consumption constraints imposed by the lines have not been considered in the present study: it has in fact been assumed that it will be the infrastructure manager's duty to adjust the power of the electric plants in function of the power consumed by any possible prototype train, if it is interesting for new markets.

The towed mass and the length of the train are generally limited, albeit indirectly, on lines with significant gradients ($\geq 25-30\%$) by the maximum stresses and strains that occur on the traction draw hooks, as imposed by the P.G.O.S. and as has been verified by means of an analysis of the rigid body.

As far as the braking system is concerned, the pneumatic system used on conventional freight trains is not free of problems [10] [11] [12], which limit the braking and release-time performances. During braking, the rapidity of the

Relativamente all'apparato frenante, il sistema pneumatico utilizzato sui treni merci convenzionali non è esente da problematiche [10] [11] [12] che ne limitano le prestazioni in frenatura e sfrenatura. In fase di frenatura, la rapidità dell'intervento del freno è limitata dalla velocità del segnale di depressione in condotta e dal tempo di riempimento dei cilindri freno. A causa della lentezza di propagazione del gradiente di pressione, nonché dall'entità del gradiente stesso, che va riducendosi allontanandosi dal rubinetto che comanda la frenatura, gli organi frenanti degli ultimi carri verranno attivati con leggero ritardo. Per questo motivo occorre attentamente calibrare l'azionamento in modo tale da scongiurare azioni frenanti scompensate che provocherebbero contraccolpi, pericolo di spezzamento degli organi di aggancio o addirittura deragliamento, mediante un aumento del tempo di riempimento del cilindro freno e di raggiungimento della pressione di regime.

Il regime di frenatura merci ("G"), come indicato dalla P.G.O.S., prevede che il tempo di frenatura sia dell'ordine di 18÷30 s per ciascun veicolo [9].

La fase di sfrenatura di un convoglio completo è invece caratterizzata da tempi dell'ordine di 45÷60 s a causa del tempo di riempimento dei serbatoi ausiliari e costituisce un perditempo notevole in seguito ad una sosta, ancorché di modesta durata [11]. I tempi tecnici della frenatura influiscono sulla velocità massima del materiale rotabile. La P.G.O.S. impone la velocità ammissibile di un convoglio in funzione della sua percentuale di massa frenata, che rappresenta l'efficacia del freno, al fine di assicurare un arresto sicuro negli spazi previsti.

Una possibile soluzione per accelerare l'azione frenante è ricorrere ad un freno pneumatico con azionamento elettrico, definito elettropneumatico. Questo prevede che l'invio del segnale di frenatura o sfrenatura avvenga mediante correnti elettriche attraverso un cavo lungo l'intero convoglio. L'azionamento elettrico, istantaneo, permetterà di fatto d'annullare i perditempo dovuti alla propagazione del segnale pneumatico di depressione in condotta. Una seconda soluzione per velocizzare l'intervento del freno è utilizzare, sugli assi motorizzati la frenatura elettrodinamica. Esso prevede, in fase di frenatura, che i motori elettrici dei carrelli motorizzati, normalmente usati nei treni a potenza distribuita, funzionino come generatori e forniscano uno sforzo di frenatura aggiuntivo.

4. Treno merci a potenza distribuita

Questo paragrafo illustra il dimensionamento globale necessario a definire un "concept funzionale" dei convogli a potenza distribuita, senza entrare nel merito della progettazione tecnica delle componenti.

Si specifica che, per quanto concerne la scelta dei carri, è stata effettuata una ricerca di mercato, una selezione ed una diretta interlocuzione con progettisti dell'azienda

intervention of the brake is limited by the speed of the depression signal in the pipes and by the time necessary to refill the brake cylinders. Given the slowness in the propagation of the pressure gradient, but also because of the entity of the gradient itself, which reduces as the distance from the valve that commands braking increases, the braking system of the wagons is activated with a slight delay. For this reason, it is necessary to carefully calibrate the activation in such a way as to prevent impaired braking actions which would cause setbacks, the danger of the breakage of the hooking systems or even derailment, through an increase in the time necessary to fill the braking cylinders and to reach the regime pressure.

The braking regime of freight trains ("G"), as indicated in the aforementioned P.G.O.S., foresees that the braking time is of the order of 18÷30 s for each vehicle [9].

The release-time phase of a complete train is instead characterised by times of the order of 45÷60 s, because of the time necessary to fill the auxiliary tanks, and it constitutes a remarkable waste of time following a halt, although of modest duration [11]. The technical times of braking influence the maximum speed of the rolling stock. P.G.O.S. imposes the maximum speed of a train in function of its percentage of towed mass, which represents the efficiency of the train, in order to ensure a safe stop within the foreseen stopping distances.

A possible solution that can be adopted to accelerate the braking action is to resort to a pneumatic brake with electronic activation, which is known as electro-pneumatic. This system foresees that the braking or release-time signals are sent by electric signals through a cable that runs along the whole train. The electric operation, which is instantaneous, in fact eliminates the waste of time, due to the propagation of the pneumatic depression signal in the pipes. Another solution that may be adopted to speed up the braking intervention is to use an electro-dynamic system on the motorised axles. This system foresees that the electric engines of the motorised wagons, which are normally used in distributed-power trains, function during braking as generators and supply extra braking power.

4. Distributed-power freight trains

This section presents an overall definition of a functional concept of a freight EMU, without entering the very details of their technical design.

It should be pointed out that, as far as the choice of the wagons is concerned, a market research, a selection and direct interlocution with the designers of the identified company were carried out: this allowed technical documentation to be obtained that would otherwise have been difficult to gather for similar projects. This process led to wagons known as Sacca60 (designed by the Prima S.r.l. company) being chosen [13], first and foremost in order to have a real example at hand, which would be very useful, although certainly not binding, for the comparison and from which to

individuata: questo ha permesso d'ottenere una documentazione tecnica altrimenti difficilmente reperibile per progetti simili. Tale disamina ha portato a scegliere carri denominati Sacca60 (frutto della progettazione dell'azienda Prima S.r.l.) [13], in primo luogo per disporre di un esempio reale – molto utile per il confronto, seppure non certo vincolante – da cui ricavare i dati caratteristici per le analisi; in secondo luogo, poiché tali carri rappresentano per l'appunto uno dei pochissimi esempi di innovativi nella struttura meccanica, vicino ai prerequisiti da noi imposti in via preliminare: carri a pianale per trasporto intermodale, adatti alle velocità indicate, più leggeri rispetto ai carri esistenti pensando anche ad un esercizio su linee AV straniere, adatti a composizioni elettrificabili e con assi motorizzabili.

4.1. Composizione

S'intendono definire in primo luogo le specifiche tecniche desiderabili in un convoglio a potenza distribuita utilizzabile per il trasporto merci, analizzandone caratteristiche e prestazioni. Dalla necessità di aumentare il traffico merci, aumentando l'affidabilità del servizio e riducendo i tempi di percorrenza, specie per merci deperibili e quelle tipiche dell'e-commerce, nasce l'idea di trasferire il concetto di treno ad alta velocità dall'ambito passeggeri all'ambito merci. Non è del tutto nuova tale idea e diversi spunti di grande interesse sono già stati proposti in [14].

Si decide di abbandonare la logica di trasporto a carro singolo adottando tuttavia una composizione modulare: il treno analizzato sarà costituito da blocchi di carri (moduli), ciascuno dei quali formato da un numero impostato di unità, caratterizzato da un primo carro motorizzato e dai rimanenti solo portanti o folli, come riportato in Fig. 1 e Fig. 2.

Ciascun blocco sarà inscindibile dal punto di vista funzionale, ma sarà possibile comporre un convoglio utilizzando uno o più blocchi.

obtain the characteristic data for the subsequent analyses. The second reason pertains to the fact that, as such a wagon represents one of the few examples of innovativeness of the mechanical structure, it was close to the requirements that the authors had previously established: these include platform wagons for intermodal transport that would be suitable for the indicated maximum speeds and lighter than the already existing wagons; the requirements include the possibility of electrifying the wagons, with drive axles, i.e. motorised axles.

4.1. Composition

The technical specifications that are desirable for a distributed-power train used for freight transport were first defined after analysing the characteristics and performances. The idea of transferring the concept of high-speed passenger train to the goods sector arose from the necessity of increasing the freight train traffic, increasing the reliability of the service and reducing the travel times, especially for perishable goods and the typical e-commerce goods. Such an idea is not exactly new, and several points of great interest were proposed in [14].

It was decided to abandon the logic of single wagonload transport, although a modular composition was adopted: the analysed train can be built of blocks of wagons (modules), each of which can be made up of an imposed number of units, and characterised by a first motorised wagon, while the remaining ones will be not-motorised, as reported in Fig. 1 and Fig. 2.

Each block will be inseparable, from the functional point of view, but it will be possible to arrange a train using one or more blocks.

It is important to underline that the decision to operate with a particular type of train in a determined zone depends on factors relative to both the demand and the offer, such as, for example, the configuration of the network, the strategic orientation of the operators and, in particular, the volume and structure of the demand [6].



Figura 1 – Esempio di convoglio costituito da due moduli, ciascuno formato da quattro unità. In ciascun modulo, solo un'unità è motorizzata, le rimanenti sono portanti (folli).

Figure 1 – Example of a train made up of two modules, each of which is formed by four units. Only one unit is motorised in each module and the remaining ones are load-bearing (not-motorised).



Figura 2 – Esempio di modulo con unità di testa motorizzata.

Figure 2 – Example of a module with a motorised head unit.

È importante sottolineare che la scelta di operare con un particolare tipo di treno in una determinata zona dipende da fattori relativi sia alla domanda sia all'offerta, quali ad esempio la configurazione della rete, gli orientamenti strategici degli operatori e, in particolare, il volume e la struttura della domanda [6].

La composizione del treno è completata scegliendo una tipologia di carro merci innovativo, che raggiunga velocità elevate e garantisca la flessibilità nell'ottica di un trasporto intermodale, ed un'unità di testa.

4.2. Carri

Si è deciso d'utilizzare – nella composizione dell'elettrotreno – i carri Sbggnss, denominati anche "Sacca60", poiché rappresentano un esempio di carro innovativo e flessibile adatto alle esigenze del moderno trasporto intermodale (Fig. 3).

Si tratta di carri merci per trasporto di UTI in regime di alta capacità ed in condizioni di flessibilità che puntano a superare la principale limitazione in cui incorrono i carri intermodali in esercizio, ovvero le dimensioni esterne dei container e delle casse mobili trasportabili, in relazione con le geometrie della sagoma cinematica del veicolo di carico [10].

Mentre il trasporto su gomma consente ampi margini di sagoma per il carico di moduli unificati (si ricorda che esistono container alti 8', 8'6", 9'6"), quello su rotaia si presenta meno competitivo per limiti di sagoma imposti dalle opere d'arte ereditate dai due secoli scorsi.

Il carro Sbggnss in questione si propone di superare tale inconveniente disponendo di un piano di carico ribassato che consente un più abbondante margine per la scelta delle combinazioni di carico, fino a comprendervi

The composition of the train was completed by choosing an innovative type of freight wagon, which is able to reach high speeds and guarantee flexibility, in view of an intermodal form of transport, and a head unit.

4.2. Wagons

It was decided to make use of Sbggnss wagons, which are also known as "Sacca60", for the composition of the electric train, as they represent an example of innovative and flexible wagon that is suitable for the requirements of modern inter-modal transport (Fig. 3).

These wagons are used for the freight transport of ITUs in high-capacity regimes and under flexible conditions, and have the aim of eliminating the main limitations of the inter-modal wagons currently in use, that is, the external dimensions of the containers and of the transportable swap-bodies, in relation to the geometries of the kinematic shape of the loading vehicle [10].

Although road transport allows a large gabarit for the loading of unified modules (it should here be recalled that containers exist as high as 8', 8'6", 9'6"), rail transport is less competitive regarding the loading gauge limits, which are imposed by the civil artworks inherited from the last two centuries.

The Sbggnss wagon in question aims to overcome such a drawback, as it has a lowered loading platform, which allows a larger margin for the choice of the load combinations, and can even include modules with the maximum standard dimensions: 9'6" high or "high cube" containers [13], in addition to the other ITUs (swap bodies and semi-trailers).

Another characteristic of the wagon is that it was thought up for regime speeds of 160 km/h, which means it

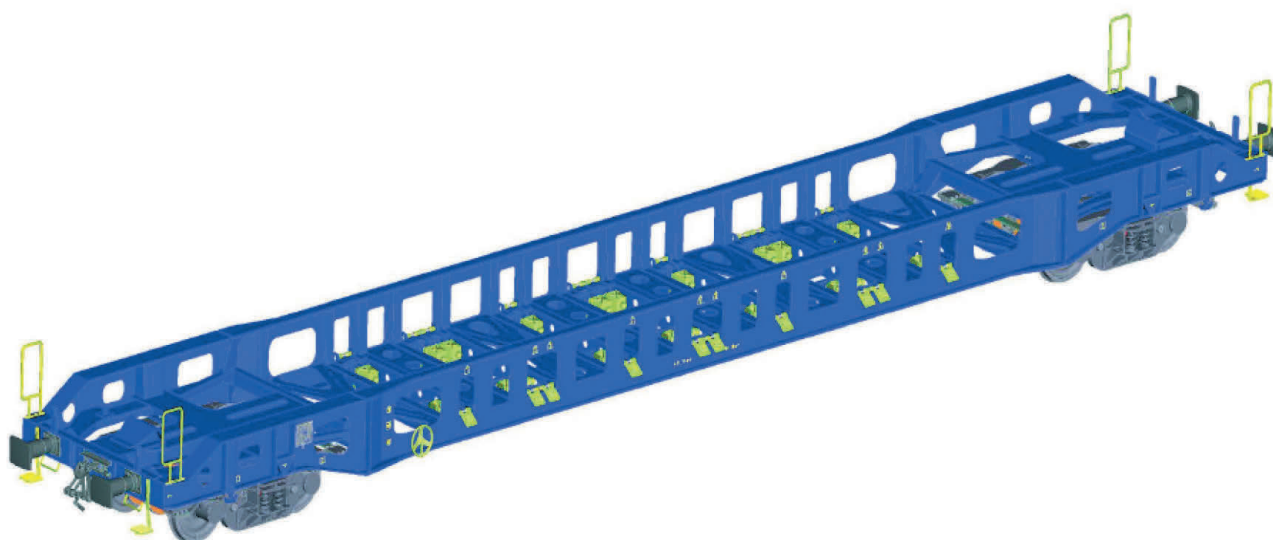


Figura 3 – Modello 3D del carro Sacca60 [13].
Figure 3 – 3D model of the Sacca60 wagon [13].

anche moduli delle dimensioni massime standard: i container alti 9'6" o "high cube" [13], oltre evidentemente alle altre UTI (casce mobili e semirimorchi).

Un'altra caratteristica del carro è quella d'essere concepito per velocità di regime di 160 km/h, che lo rende proponibile tra i primi esempi di rotabile ferroviario per trasporti ad alta velocità, in relazione ai valori raggiunti dai treni merci attuali [7] [8]. Il raggiungimento della velocità massima di 160 km/h è consentita dall'adozione di un carrello speciale denominato Y225, progettato per l'applicazione in questione, con doppia sospensione ed impianto frenante a dischi [11].

Sul carrello è previsto il montaggio di sale con ruote di diametro 920 mm ed il carico massimo per asse, per velocità di 120 km/h, è stimato a 22,5 t, che si riduce per regimi di velocità superiore. Il limite massimo di peso complessivo, con veicolo a pieno carico, risulta essere di 90 t a 120 km/h.

Il valore della tara è di circa 32 t ma, a detta dei progettisti, il valore può essere contenuto a circa 26 t grazie ad operazioni di alleggerimento del telaio; si tenga peraltro presente che merci deperibili e collettame raccolto in UTI, merce oggi esclusiva del trasporto stradale, sono ben più leggere di quelle tradizionalmente prerogative del trasporto ferroviario. Questo tema non è marginale, per motivi ripresi nel seguito.

La particolarità, che peraltro contraddistingue in modo evidente il carro in questione e ne costituisce uno dei punti di forza più interessanti, è rappresentata dalla possibilità di predisporre due diverse altezze rispetto al piano del ferro per il piano di carico relativo alla parte centrale del telaio: un piano ribassato all'altezza di 840 mm ed un piano in linea all'altezza di 1080 mm. Il veicolo è difatti attrezzato con appositi dispositivi, denominati caviglie, che possono essere posti in configurazione di lavoro, o escluse, in funzione delle combinazioni di carico scelte.

4.3. Unità di testa

L'unità di testa non sarà evidentemente l'unico elemento di trazione del convoglio nel caso di potenza distribuita. Non essendo presenti nel panorama ferroviario treni analoghi a quello proposto s'intendono definire, a grandi linee, i requisiti che dovranno essere presi in considerazione nel caso della progettazione dell'unità di testa. Le caratteristiche necessarie si riducono sostanzialmente a massa, lunghezza e peso frenato. Per definire tali grandezze, sono state considerate le unità di testa dei principali elettrotreni utilizzati nell'ambito del trasporto passeggeri, ad esempio ICE 3 e TGV. S'ipotizza un rotabile avente due carrelli, ciascuno dei quali equipaggiato con un asse motorizzato, cabina di condotta con locale per il personale, profilo affusolato in grado di ospitare la struttura deputata all'assorbimento di energia cinetica in seguito ad eventuale urto e contenere le resistenze aerodinamiche.

is one of the first examples of high speed rail transport for freight, in relation to the values reached by the current freight trains [7] [8]. Reaching a maximum speed of 160 km/h is made possible thanks to the use of a special bogie named Y225, which was specifically designed for the present project, with a double suspension and a disk braking system [11].

The bogie will feature 920 mm diameter wheels with a maximum load per axle of about 22.5 t, for speeds of 120 km/h, which, however, should be reduced for higher speed regimes. The maximum limit of the overall weight results to be 90 t at 120 km/h for fully loaded vehicles.

The tare value is about 32 t but, according to the designers, the value could be further limited to about 26 t, as a result of frame lightening operations. Moreover, it should be taken into consideration that perishable goods and the mixed cargo gathered in ITU, which are currently exclusively transported by road, are much lighter than those that are traditionally the prerogative of rail transport. This theme is not of marginal importance, as will be seen later on.

The particular feature of the wagon in question, which also distinguishes it from other wagons and constitutes one of the most interesting points in its favour, is related to the fact that two different heights of the loading platform can be arranged, with respect to the rail level, relative to the central part of the frame: a platform lowered to a height of 840 mm and a platform in line at a height of 1080 mm. The vehicle is equipped with specific devices, named ankles, which can be inserted in working configurations, or removed, in function of the combinations of loads chosen.

4.3. Head units

The head unit is obviously not the only traction element of the train in the case of distributed power. As there are no other similar trains available in the railway panorama that can be proposed here, the requirements that need to be taken into consideration, for designing of the head unit, are here defined broadly. The necessary characteristics can basically be reduced to: mass, length and braked weight. In order to define such magnitudes, the head units of the main electric trains used for passenger transport were considered, for example ICE3 and TGV. A two bogie unit – each of which could be equipped with a motorised axle, fitted to a driver's cab, with space for the personnel, has been hypothesised. The cab could feature a tapered profile that is able to host the structure assigned for the consumption of kinetic energy, following any possible collisions, and reduce the aerodynamic resistances at higher speeds.

The electric current will be collected by means of either a single or double pantograph, installed on the top of the unit, and will be sent, through a specifically dedicated electric cable, to the motorised carriages positioned along the train.

The technical characteristics of the head unit are reported in Tab. 2. It should be pointed out that the assumption

La corrente elettrica verrà assorbita mediante panto-grafo, singolo o doppio, installato sull'imperiale, ed inviata, mediante un'apposita condotta elettrica dedicata, ai carrelli motorizzati dislocati lungo il convoglio.

Nella Tab. 2 vengono riportate le caratteristiche tecniche dell'unità di testa, precisando che l'assunzione di tali valori, avvenuta confrontando i rotabili esistenti, influenzerà in maniera marginale i risultati dello studio.

È stata scelta una massa frenata tale da ottenere una percentuale di massa frenata simile a quella dei carri. È buona pratica infatti, per minimizzare le sollecitazioni longitudinali e gli sforzi agli organi di trazione e repulsione, scegliere un locomotore avente percentuale di massa frenata, e di conseguenza efficienza dell'apparato frenante, inferiore a quella dei carri in composizione, senza peraltro compromettere la capacità frenante dell'intero convoglio [10] [15].

4.4. Motorizzazione

Il progetto del carro al quale si è fatto riferimento come base (Sacca60) riguarda invero la realizzazione di un carro intermodale utilizzabile in convogli tradizionali non dotato di carrelli motorizzati. Analizzandone la geometria, emerge che non esiste una posizione nella quale possano essere collocati i motori elettrici: si propone quindi un'eventuale riprogettazione, fattibile a detta dei progettisti, per adattare il carro ed i carrelli Y225 all'accoglimento dei motori elettrici scelti. Si è deciso di prendere come riferimento, per le simulazioni, i dati caratteristici dei motori elettrici Alstom FJA 3257 A, utilizzati su treni ad alta velocità da Trenitalia, RENFE, SSB, MOR e PKP, autoventilanti, aventi caratteristica coppia-velocità come indicato dal grafico in 4.

Caratteristica importante è l'ampio campo di utilizzo della frenatura elettrodinamica, indicata dalla curva *braking* sul grafico di Fig. 4; questa si sovrappone sostanzialmente alla curva di trazione, per sottolineare un ottimo sforzo frenante anche a basse velocità.

La disposizione dei motori può avvenire collocando entrambi i motori su un unico carrello, che disporrà quindi di entrambi gli assili motorizzati, oppure suddividendo i motori sui due carrelli di ciascun carro motorizzato. Con quest'ultima configurazione ciascun carrello sarà dotato di un asse motorizzato e di uno portante o folle; verrà inoltre garantita una migliore ripartizione del peso del veicolo, a scapito di un intervento necessario su entrambi i carrelli.

La scelta della configurazione non incide sulle prestazioni, analizzate successivamente; inoltre la disposizione di due motori elettrici sui carrelli dei carri motorizzati implicherà una riduzione dei dischi frenanti su ciascun assile, dunque della prestazione frenante del carro in questione.

Tabella 2 – Table 2

Grandezze caratteristiche dell'unità di testa
Characteristic magnitudes of the head unit

Grandezze caratteristiche unità di testa Characteristic magnitudes of the head unit	
Massa Mass	50 t
Lunghezza Length	20 m
Massa frenata Braked mass	60 t

of such values, which were obtained from a comparison of the existing stock, would only influence the results of the study in a very marginal way.

The braked mass was selected in such a way as to obtain a similar percentage of braked mass to that of the wagons. It is in fact good practice to choose a locomotive with a lower braked mass percentage, and consequently lower performance of the braking apparatus than that of the connected wagons, without, however, compromising the braking capacity of the whole train, in order to minimise the longitudinal stresses and strains on the traction and buffing components [10] [15].

4.4. Motorisation

The design of the basic wagon to which reference was made (Sacca60) in fact concerns the realisation of an intermodal wagon that can be used in traditional trains not equipped with motorised carriages. From an analysis of the geometry, it has emerged that there is no position in which electric engines can be placed: a possible re-design process, which the designers indicated would be possible, was therefore proposed to adapt the wagon and the Y225 carriages so that they could house the chosen electric engines. It was decided to take the characteristic data of the Alstom FJA 3257 A self-ventilating electric engine as a reference for the simulation, as it is used on the Trenitalia, RENFE, SSB, MOR and PKP high-speed trains. The torque-speed characteristics of this engine are indicated in the graph in Fig. 4.

An important characteristic is the wide range of use of electro-dynamic braking, as indicated by the braking curve in the graph in Fig. 4; this basically overlaps the traction curve, thereby underling the excellent braking force, even at low speeds.

The engines may be arranged by placing both of the engines on a single carriage, which is therefore arranged with both of the motorised axles, or by sub-dividing the engines between the two carriages, with each wagon being motorised. In this latter configuration, each carriage will be equipped with a motorised axis and a load-bearing one (or non-motorised); furthermore, a better division of the weight of the vehicle will be guaranteed, at the expense of an inter-

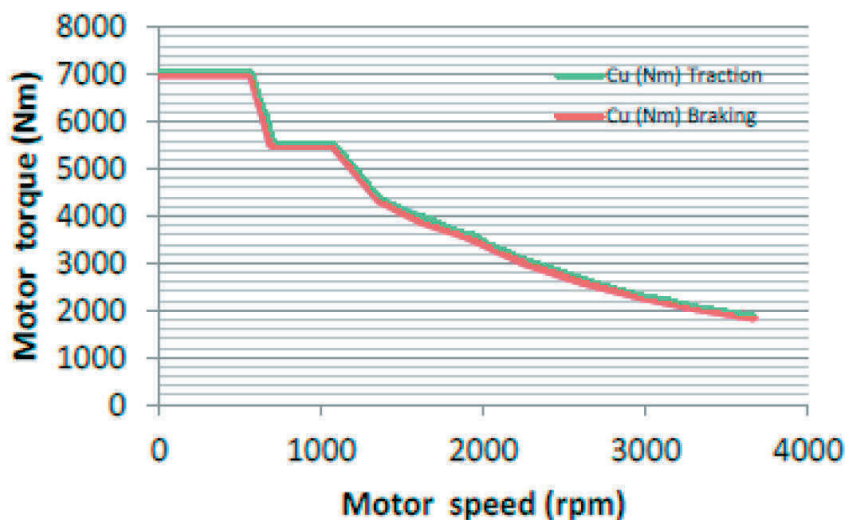


Figura 4 – Grafico coppia-velocità del motore elettrico Alstom FJA 3257 A.
Figure 4 – Graph of the torque-speed of the Alstom FJA 3257 A electric engine.

L'alimentazione dei motori sarà consentita grazie alla condotta elettrica che, in parallelo alla condotta pneumatica e alla linea di controllo degli azionamenti di trazione e degli eventuali ausiliari, ospitabili in appositi vani nel sotto-cassa dei carri, percorrerà l'intero convoglio.

Ciascun carro sarà equipaggiato con accoppiatori elettrici molto simili a quelli pneumatici: in fase di composizione del treno, un aggancio automatico integrato di tipo Scharfenberg ad esempio, oltre ad unire fisicamente i rotabili, collegherà i terminali pneumatici ed elettrici di testa di un carro con quelli del successivo.

La presenza di moduli a composizione bloccata permette di velocizzare le operazioni di configurazione, dovendosi collegare solamente gli accoppiamenti di un blocco con quelli del successivo, essendo i carri dello stesso modulo (semi-) permanentemente accoppiati.

L'adozione di un accoppiatore automatico e la configurazione modulabile rappresentano grandi vantaggi in termini di tempo e impiego di personale, permettendo una rapida e sicura composizione dei convogli. Basandosi sulla norma UIC 520, disposizione fondamentale che regola l'intercambiabilità degli elementi costitutivi dell'organo di trazione e definisce le caratteristiche di resistenza meccanica nonché le dimensioni fondamentali di tali componenti, è stato verificato che la forza richiesta per il traino dei carri merci, necessaria ad assicurare una partenza in salita su un tratto con livelletta del 30‰, risulta sempre inferiore alla massima forza di trazione longitudinale trasferibile da un aggancio Scharfenberg. Oltretutto, l'unità di testa e ciascun carro motorizzato dovranno trainare solamente i carri merci folli adiacenti ed appartenenti allo stesso modulo.

Si è ritenuto che l'impiego di una potenza installata di 1,416 MW per le unità motorizzate sia un adeguato compromesso utile per consentire l'allungamento del convo-

vention that will be necessary on both of the carriages.

The choice of such a configuration will not affect the performances, which are analysed hereafter: moreover, the arrangement of two electric engines on the motorised carriages implies a reduction in the number of braking disks on each axle, that is, of the braking performance of the wagon in question.

The power supply to the engines will be possible thanks to the electric cable which, parallel to the pneumatic pipe and to the activation of traction control line and any possible auxiliary devices, housed in specific compartments underneath the wagons, will run along the entire length of the train.

Each wagon will be equipped with electric couplers that are similar to the pneumatic ones: during the composition phase of the train, an integrated automatic coupler, of the Scharfenberg type for example, will be used not only to physically connect the stocks, but also to connect the pneumatic and electric head terminals of a wagon to the successive ones.

The presence of fixed composition modules allows the configuration operations to be accelerated, as only one block has to be coupled with the next one, since the wagons of the same module are (semi-) permanently coupled.

The adoption of an automatic coupler and the modular configuration introduces great advantages, in terms of time and employment of the personnel, as they allow a rapid and safe composition of the trains. It was verified that the force required to tow freight wagons, and which is necessary to ensure an uphill start on stretches with a gradient of 30‰, was always below a maximum longitudinal traction force that could be transferred by a Scharfenberg hook. This verification was based on UIC standard 520, which is the fundamental provision that regulates the interoperability of the components that make up the traction equipment and defines the mechanical strength characteristics as well as the fundamental dimensions of such components. Moreover, the head unit and each motorised wagon should only be towed by adjacent non motorised freight wagons belonging to the same module.

It was considered that the use of an installed power of 1,416 MW for the motorised units could be a good compromise that would allow the train to be lengthened and a discrete but unlimited increase of the installed power.

The power of the distributed-power train can in fact be increased at will, as there are no limits on the maximum number of allowed locomotives that characterise traditional trains (in the case of multiple traction, normally 2 or a maximum of 3 are used). In the case in question, the num-

glio ed un aumento discreto ed illimitato della potenza installata.

La potenza dei convogli a trazione distribuita risulta difatti incrementabile a piacere, non essendovi i limiti sul massimo numero di locomotori consentiti (in caso di trazione multipla, normalmente 2 o al massimo 3) che caratterizzano i convogli tradizionali. Nel caso in esame il numero di unità motorizzate deve rispondere al solo vincolo di assorbimento elettrico imposto dall'infrastruttura.

Gli studi del moto sono eseguiti su un convoglio merci tradizionale e prototipo a parità di carico utile utilizzando il metodo dell'integrazione tabellare. Si evidenziano valori di accelerazioni simili per treni pienamente carichi che debbano raggiungere 120 km/h (Tab. 3):

- accelerazione merci tradizionale (servizio orario): 0,21 m/s²;
- accelerazione elettrotreno merci: 0,23 m/s².

Al fine del calcolo delle resistenze ordinarie al moto per l'integrazione tabellare, è stata utilizzata una formula binomia avente come coefficienti $a = 3$ e $b = 0,0004$. In tal fase è stato considerato un convoglio viaggiante su una linea rettilinea in piano, vale a dire che sono state ignorate eventuali resistenze incidentali.

Si evince inoltre la differenza di prestazioni per convogli prototipi parzialmente carichi che sfruttano una distribuzione omogenea, ovvero con carico suddiviso uniformemente su ciascun carro, o disomogenea, con carico concentrato sui carri motorizzati. Quest'ultima soluzione favorisce il raggiungimento di alte prestazioni grazie all'incremento del peso aderente.

ber of motorised units should only respond to the power consumption constraint imposed by the infrastructure.

The studies on the running of the train were conducted on a traditional freight train and on the prototype, with the same load capacity, utilising the tabular integration method. Similar acceleration values were obtained for fully loaded trains that had to reach 120 km/h (Tab. 3):

- *acceleration of the traditional train (timetable service): 0.21 m/s²;*
- *acceleration of the electric freight train: 0.23 m/s².*

In order to calculate the normal motion resistance with tabular integration, a binomial formula was used with the coefficients and. At this stage, a train travelling along a flat straight line was considered, that is, any possible incidental resistances were ignored.

The difference in performance of partially loaded prototype trains that take advantage of a homogeneous distribution, that is, with the load shared uniformly over the wagons, and an uneven load, with the load concentrated on the motorised wagons, also emerges. The latter solution favours higher performances thanks to the increase in the adhesive weight.

4.5. Braking system

Unlike what happens on traditional freight trains, on which the only braking system is of a pneumatic type, an electric-pneumatic type of system has been foreseen for the proposed electric-train. The electrification of the train, which is already necessary for the power supply to the electric en-

Tabella 3 – Table 3

Accelerazioni medie al variare del carico per convogli tradizionali e per convogli a potenza distribuita (per carico omogeneo e carico disomogeneo). I diversi valori "avviamento" e "servizio orario" sono stati ricavati utilizzando le curve caratteristiche di trazione per il transitori di avviamento o di servizio orario continuativo mediamente di 30 [kN/mm] per un aumento di temperatura pari a 1 [°C]) [2]

Mean acceleration as the load varies for traditional trains and for distributed-power trains (for homogeneous loads and uneven loads). The different "start-up" and "timetable service" values were obtained using the characteristic traction curve of the start-up or continuous timetable service transients [kN/mm] for a temperature increase of 1 [°C]) [2]

Percentuale di carico [%] <i>Prototype train</i>	Convoglio tradizionale <i>Traditional train</i>		Convoglio prototipo <i>Prototype train</i>	
	a_{media} avviamento [m/s ²] a_{mean} start up [m/s ²]	a_{media} servizio orario [m/s ²] a_{mean} timetable service [m/s ²]	a_{media} carico omogeneo [m/s ²] a_{mean} homogeneous load [m/s ²]	a_{media} carico disomogeneo [m/s ²] a_{mean} uneven load [m/s ²]
0%	0,69	0,61	0,27	0,27
25%	0,48	0,43	0,25	0,43
50%	0,37	0,32	0,24	0,33
75%	0,29	0,26	0,23	0,27
100%	0,24	0,21	0,23	0,23

4.5. Sistema frenante

Contrariamente a quanto avviene sui treni merci tradizionali, sui quali l'unico sistema frenante è pneumatico, nel caso dell'elettrotreno proposto può essere previsto un impianto di tipo elettropneumatico. L'elettificazione del convoglio, già necessaria per l'alimentazione dei motori elettrici distribuiti lungo il convoglio, implicherà necessariamente la presenza di una linea di controllo per la regolazione degli azionamenti di potenza [16]. La stessa linea di controllo potrà essere utilizzata anche per l'eccitazione delle elettrovalvole di frenatura e sfrenatura, collocate sui distributori di ciascun veicolo in composizione.

Come anticipato, il principale vantaggio del freno elettropneumatico è la sua velocità di controllo, da cui scaturiscono veloci tempi d'intervento sulla dinamica del veicolo, in quanto tutti i solenoidi delle elettrovalvole vengono eccitati allo stesso tempo e consentono al macchinista di controllare quasi istantaneamente l'intero treno. Questo rappresenta un indubbio vantaggio esaltato dall'applicazione a convogli di lunghezza notevole, come i 750 indicati già da alcuni anni come traguardo in Europa [17].

La presenza della potenza distribuita sul convoglio qui analizzato permette inoltre una frenatura elettrodinamica particolarmente efficace, comunque preventiva alla frenatura meccanica [18]. L'energia generata dai motori potrà inoltre essere reimpressa in linea ed utilizzata da altri convogli eventualmente in fase di trazione nella stessa area di alimentazione elettrica.

In analogia ai sistemi attualmente installati sulle moderne elettromotrici o elettrotreni, i due sistemi di frenatura saranno gestiti da un sistema di controllo centralizzato del freno, impostato in modo tale da prediligere l'utilizzo del freno elettrodinamico, aiutando così a limitare l'usura delle componenti meccaniche.

Se il freno elettrodinamico è sufficiente ad assicurare le decelerazioni puntualmente richieste dal convoglio, l'intervento del freno pneumatico non viene attuato e viceversa. I vantaggi derivanti da una frenatura elettrodinamica distribuita lungo il convoglio vengono esaltati dalla maggiore massa aderente, analogamente alla fase di trazione.

La frenatura elettrodinamica risulta altresì adatta per effettuare una frenatura di contenimento prolungata in caso di marcia su livellette in discesa d'elevata estensione. Per treni equipaggiati col solo freno ad attrito, l'articolo 21 del documento "Istruzione sull'esercizio del freno continuo automatico per i convogli di RFI" [15] definisce la cosiddetta "frenatura di ritenuta a denti di sega" al fine di evitare il surriscaldamento eccessivo degli organi frenanti. Essa consiste in applicazioni di frenature periodiche rallentando il convoglio fino ad una certa percentuale della velocità massima ammessa in quel tratto di linea. In seguito, i freni vengono rilasciati lasciando il treno libero di accelerare per la sola gravità fintantoché non raggiunga una velocità prossima a quella massima, ripetendo poi il ciclo. Il particolare profilo di velocità che ne risulta dà

gines distributed along the train, implies the need for the presence of a control line to regulate the power drives [16]. The same control line may also be used for the excitation of the braking and release solenoid valves, which are positioned on the brake distributors of each connected vehicle.

As anticipated, the main advantage of electro-pneumatic braking is its fast application, since all the solenoid valves of the electro-valves are excited at the same time and this allows the driver to control the whole train almost instantaneously.

The advantages of such an electro-pneumatic brake would be enhanced for a train with a remarkably long length, as has been well known for some years for the 750 m trains in Europe [17].

Distributed power permits an effective application of electro-dynamic braking, which normally prevents the mechanical one [18]. The thus generated energy from the engines could be reinserted into the line and utilised by other trains, possibly in the traction phase, in the same electric supply area.

In analogy with the systems that are at present installed on modern railcars or electric trains, the two braking systems will be controlled by a centralised brake control system, set in such a way as to favour the use of the electro-dynamic brake, in this way helping to limit the wear of the mechanical components.

If the electro-dynamic brake is sufficient to ensure the punctual decelerations requested by the train, the pneumatic brake intervention is not activated, and vice versa.

The advantages that can be derived from electro-dynamic braking, distributed along the entire train, are enhanced by the greater adhesive mass, in a similar way to the traction phase.

Electro-dynamic braking is also suitable for carrying out a prolonged containment braking, when running on a downhill gradient of elevated extension. Article 21 in the document "Istruzione sull'esercizio del freno continuo automatico per i convogli di RFI" (Instructions on the use of automatic continuous braking for trains) [15] defines the so-called "frenatura di ritenuta a denti di sega" (saw-tooth holding braking) in order to prevent overheating of brakes. It consists in periodic brakings to slow down the train to a certain percentage of the maximum allowed speed in that particular stretch of the line. The brakes are then released, leaving the train free to accelerate, only thanks to gravity, until it reaches a speed close to the maximum speed. At this point, the cycle is repeated, and this leads to that particular speed profile that gives the name to the manoeuvre. It should be pointed out that such a speed profile implies longer travel times, for the same section, than running at a constant speed.

Whenever the electro-dynamic braking force is able to compensate for the force-weight component parallel to the downhill direction, directed in the running direction, and on condition that the produced energy may be absorbed by

il nome alla manovra. Si evidenzia come tale profilo di velocità implichi tempi di percorrenza superiori, a parità di tratta, rispetto ad una marcia a velocità costante.

Qualora la frenatura elettrodinamica fosse in grado di compensare la componente di forza peso parallela alla direzione discendente, diretta nella direzione del moto, e ammesso che l'energia prodotta possa essere scaricata in linea o dispersa da un reostato, la marcia in discesa "a denti di sega" può essere limitata o totalmente eliminata.

È importante sottolineare che l'introduzione di motori elettrici su alcuni carri può influenzare le prestazioni frenanti, data la riduzione del numero di dischi. Ciascun assile portante presenterà tre dischi di frenatura, mentre ciascun assile motore ne presenterà due, dovendo necessariamente ricavare spazio per gli organi meccanici collegati al motore elettrico; analogamente questa proprietà caratterizza gli assi dei carrelli dell'unità di testa.

Il moto di frenatura del convoglio è stato studiato ponendo particolare attenzione alla successiva simulazione in esercizio. Il calcolo delle decelerazioni in fase di frenatura è stato eseguito considerando la *percentuale di massa frenata*. Nota tale percentuale e grazie alle tabelle B riportate nella PGOS di RFI, è possibile ricavare la velocità massima che il convoglio può assumere garantendo l'arresto entro gli spazi di frenatura previsti in funzione del grado di frenatura della linea, valore correlato alla pendenza di essa.

Ipotizzando che lo spazio di arresto massimo consentito sia di 1000 m, valore cautelativo in quanto la distanza tra segnali di avviso e protezione è solitamente dell'ordine dei 1200 m sui tratti pianeggianti e maggiore sui tratti in pendenza, si è in grado di ricavare le decelerazioni e le forze richieste all'apparato frenante sia per i convogli merci tradizionali, sia per i convogli merci innovativi, supposti equipaggiati rispettivamente con freno di tipo merci e freno di tipo viaggiatori. La scelta della frenatura di tipo merci per i convogli tradizionali è stata motivata da confronti con operatori del settore.

Partendo dal vettore delle velocità massime raggiungibili per ciascun grado di frenatura riscontrabile sono calcolati i valori di decelerazione media: essi verranno utilizzati nella simulazione della marcia del convoglio a seconda del grado di frenatura vigente sul tratto di linea percorso dal treno.

Confrontando il treno merci tradizionale ed il convoglio prototipo, sempre a parità di carico utile trasportato, si ottengono i seguenti valori di decelerazioni al variare del grado di frenatura (Fig. 5):

the overhead line or dispersed by a rheostat, the "saw-tooth" downhill movement may be limited or even totally eliminated.

It is important to point out that the introduction of electric engines on some wagons may influence the braking performance, as a result of the reduction of the number of disks. Each bearing (not-motorised) axle will have three braking disks, while each motorised axle will have two, as it will be necessary to leave space for the mechanical gearbox connected to the electric engine; in a similar way, this property characterises the bogie axles of the head unit.

The braking movement of the train was studied by paying particular attention to the subsequent simulation under working conditions. The deceleration, during braking, was calculated considering the percentage of braked mass. Once such a percentage had been calculated, and thanks to Table B reported in the PGOS of the RFI, it was possible to obtain the maximum speed that the train could undertake, while guaranteeing its stopping within the braking distances foreseen in function of the braking degree of the line, a value that is correlated with the slope of such a line.

By hypothesising that the maximum stopping distance allowed is 1000 m, which is a cautious value in that the distance between warning and protection signals is usually of the order of 1200 m on flat stretches and greater on sloping stretches, it was possible to obtain the deceleration and force necessary for the braking apparatus for both traditional freight trains and for innovative freight trains, considered to be set to goods and passenger mode, respectively. The choice of the good braking mode for the conventional freight train is motivated by discussion with sector's operators.

Starting from the vector of the maximum speed that could be reached for each braking degree that could be as-

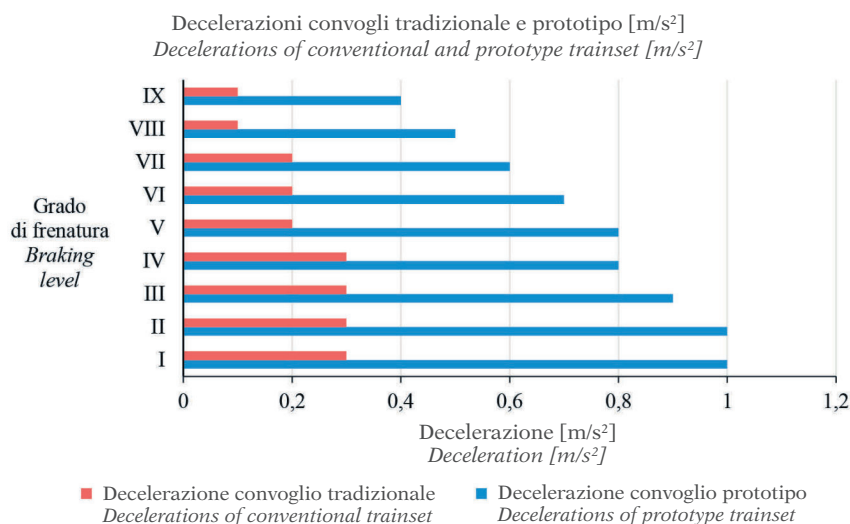


Figura 5 – Decelerazioni medie per convoglio merci tradizionale e convoglio prototipo a potenza distribuita al variare del grado di frenatura della linea.

Figure 5 – Mean deceleration or braking degree of a traditional freight train (in red) and the deceleration of the prototype train, with distributed-power (in blue).

- treni merci tradizionali: 0,10 – 0,30 m/s²;
- elettrotreno merci: 0,40 – 1,00 m/s².

4.6. Flessibilità

È ragionevole ritenere che il progetto del convoglio in analisi debba essere ulteriormente approfondito e dettagliato. Vale la pena sottolineare come il rotabile rappresenti un'evoluzione di ampia portata nel panorama dei carri intermodali fino ad oggi in esercizio, dal punto di vista funzionale, strutturale e costruttivo.

La possibilità di trasportare UTI di diverse dimensioni e con diverse combinazioni si accoppia con la necessità di adattarsi a qualsiasi evenienza di movimentazione, evitando molte preclusioni di sagoma legate all'ingombro delle UTI; anche l'allungamento del treno a 750 m è in questo modo attuabile senza necessità d'intervenire sulle sezioni di blocco, moduli di binario e distanziamento dei segnali.

Il vantaggio di disporre dell'alimentazione elettrica lungo l'intero convoglio può inoltre consentire agevolazioni sia per la marcia del treno sia per un trasporto di maggiore qualità, ampliando enormemente il bacino potenziale di merci oggi intercettabili dalla ferrovia. Vengono riportati in seguito spunti riguardanti le migliorie effettuabili, grazie all'elettificazione:

- possibilità di alimentare container refrigerati (*Reefer*), dotati di un gruppo frigorifero ed adibiti al trasporto di merci deperibili che necessitano un controllo costante di temperatura e umidità (generi alimentari, medicinali, prodotti chimici, ecc.);
- alimentazione di eventuali compressori disposti a bordo dei carri, dunque distribuiti lungo il convoglio per velocizzare l'operazione di riempimento della condotta generale nonché dei serbatoi ausiliari e di comando del freno a seguito di una manovra di frenatura, contribuendo così a ridurre i tempi di sfrenatura del convoglio;
- possibilità d'installazione ed alimentazione di sistemi di diagnostica delle componenti dei carri;
- modifiche apportabili all'impianto di illuminazione delle luci di coda del convoglio, per migliore sicurezza e visibilità, in sostituzione delle lanterne a batteria oggi utilizzate.

È importante sottolineare che potrà essere richiesta una verifica sull'infrastruttura per consentire il transito dell'elettrotreno merci su tutte le linee della rete; per questa ragione si può pensare di utilizzare il rotabile inizialmente per un servizio navetta su di un collegamento ad alta domanda di servizio merci. Collegamenti di tal fatta possono essere potenzialmente rappresentati da quelli retro-portuali, vale a dire tra un porto – dove massime sono in genere le quote modali a favore della ferrovia – ed un terminal merci posto nell'entroterra a distanze dell'ordine almeno di alcune decine di km, collegati da un tratto di linea avente idonee proprietà [5].

certained, the mean values of deceleration were calculated: these values were then utilised in the simulation of the running of the train, on the basis of the braking degree currently in force on the stretch of line covered by the train.

By comparing the traditional freight train and the prototype train, for the same load capacity, and varying the braking degree, the following deceleration values were obtained (Fig. 5):

- *traditional freight train: 0.10 – 0.30 m/s²;*
- *electric freight train: 0.40 – 1.00 m/s².*

4.6. Flexibility

It is reasonable to believe that the design of the here analysed train requires more detailed evaluations. It is worth pointing out that this rolling stock represents a far-reaching evolution of the panorama of the intermodal wagons in use until now, from the functional, structural and constructive points of view.

The possibility of transporting ITUs of different dimensions and with different combinations should be coupled with the necessity of adapting to any eventual handling operations, in order to avoid excluding the loading gauges that are associated with some ITUs; the lengthening of the train to even 750 m is viable in this way, without the necessity of intervening on the block sections, on the track modules or on the distancing of the signals.

The advantage of having an electric supply available along the entire train may also allow benefits for both the performances of the train in operation and for a transport of greater quality, thereby enlarging enormously the potential basin of goods that railways currently cannot cover. Some improvement opportunities that could be introduced, as a result of electrification, are reported hereafter:

- *the possibility of supplying refrigerated containers (Reefers), equipped with a refrigeration unit and used for the transport of perishable goods that require a constant control of the temperature and humidity (food-stuffs, medicines, chemical products, etc.);*
- *the possible supply of compressors arranged on board the wagons, thus distributed along the train, to speed up the filling operations of the brake pipe, but also of the auxiliary and brake control tanks following a braking manoeuvre, thereby contributing to reducing the braking times of the train;*
- *the possibility of installing and supplying diagnostic systems of the wagon components;*
- *modifications of the illumination system of the tail-lights of the train, in order to improve safety and visibility, as a substitution of the battery-powered lanterns that are currently used.*

It is important to point out that a verification on the infrastructure could be required in order to allow the electric freight train to transit over all the lines of the network; for

In Tab. 4 vengono riepilogate le differenze salienti tra treno merci tradizionale e treno merci a potenza distribuita.

5. Modellizzazione della linea Torino-Savona

5.1. La linea Torino-Savona

Per completare l'analisi, è stata analizzata la tratta Savona (Parco Doria)-Trofarello (Torino), essendo stata eseguita una distinzione funzionale tra la linea proveniente da Savona ed il nodo ferroviario di Torino. Da un punto di vista pratico, l'analisi congiunta di linea e nodo risulta tecnicamente complessa e si è preferito separarle, concentrando in questa sede sulla prima.

La linea è elettrificata in corrente continua (3000 V), con scartamento ordinario. Da Trofarello a Ceva la linea è a doppio binario; da Ceva a San Giuseppe di Cairo è a binario semplice. Ad oggi la linea si presenta come riportato in Fig. 6, nella quale sono rappresentate anche le diramazioni che si dipartono dalle località appartenenti alla tratta Trofarello-Savona Parco Doria.

Tra San Giuseppe di Cairo e Savona sono presenti due varianti di valico, costituite da due linee a singolo binario: quella passante per Ferrania, con livellette massime

this purpose, it would be possible to consider the initial use of the rolling stock for a shuttle service on one of the connections with a high goods service demand. It should be considered that such connections may be represented by dry-port connections, that is, between a port – where the modal shares in favour of the railway are generally the highest – and an inland terminal or a freight village at a distance of the order of at least some tens of km, and connected by a stretch of line with suitable properties [5].

The salient differences between a traditional freight train and a distributed-power freight train are summarised in Tab. 4.

5. Modelling of the Turin-Savona line

5.1. The Turin-Savona line

In order to complete the analysis, the stretch of line between Savona (Parco Doria) and Trofarello (Turin) was analysed, after having made a functional distinction between the line coming from Savona and the Turin railway junction. From a practical point of view, the combined analysis of line and junction has resulted to be particularly complex, and it was therefore preferred to separate them, here concentrating on the former.

Tabella 4 – Table 4

Confronto delle caratteristiche tecnologiche tra convoglio merci tradizionale e prototipo merci a potenza distribuita
Comparison between the technological characteristics of a traditional freight train and a distributed-power freight train

Confronto tra treno merci tradizionale e treno merci a potenza distribuita Comparison between a traditional freight train and a distributed-power freight train		
	Convoglio merci tradizionale Traditional freight train	Convoglio a potenza distribuita Distributed-power freight train
Tipo di trazione Type of traction	Concentrata Concentrated	Distribuita Distributed
Potenza installata Installed power	Limitata dal n° di locomotori Limited by the no. of locomotives	Illimitata Unlimited
Massa trainabile Towable mass	Limitata Limited	Illimitata Unlimited
Tipo di impianto frenante Type of braking system	Pneumatico – Tipo Merci o Viaggiatori Pneumatic – Freight or passenger type	Elettropneumatico – Tipo Viaggiatori Electro-pneumatic – Passenger type
Frenatura elettrodinamica Electro-dynamic braking	Disponibile sul locomotore Available on the locomotive	Disponibile su tutti i carrelli motorizzati Available on all the motorised carriages
Velocità massima Maximum speed	120 km/h	160 km/h
Trasporto container refrigerati Transport of refrigerated containers	No	Sì Yes
Elettificazione del convoglio Electrification of the train	No	Sì Yes
Combinazioni di carico Load combination	Limitate Limited	Numerose Numerous

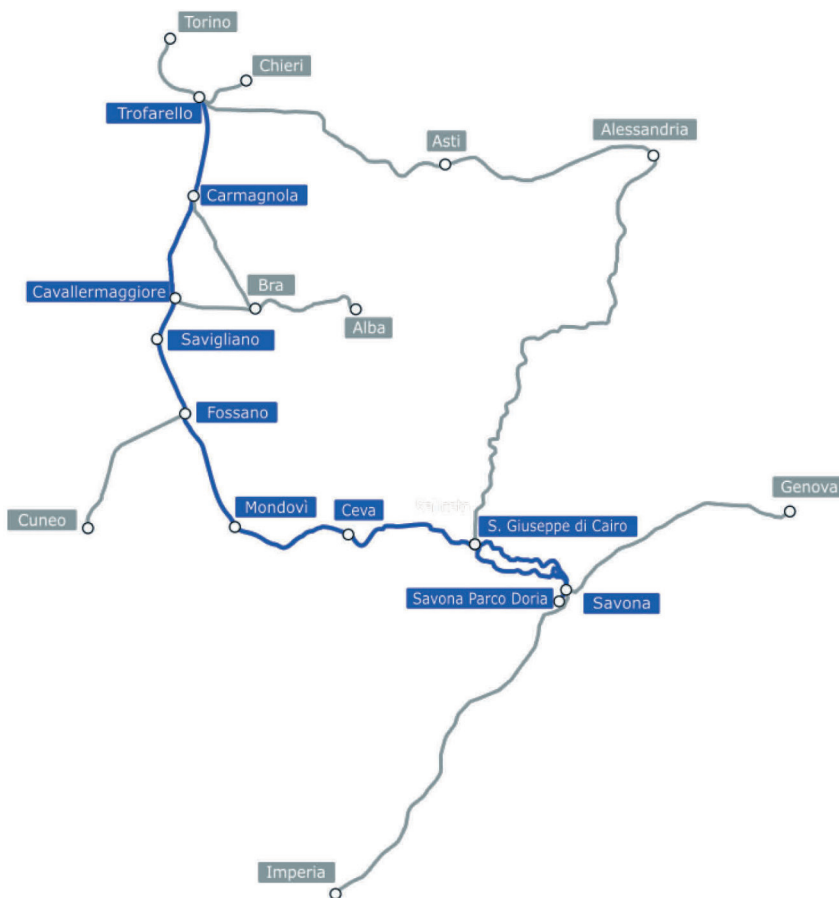


Figura 6 – Schema della linea ferroviaria Trofarello-Savona Parco Doria.
Figure 6 – Layout of the Trofarello-Savona (Parco Doria) railway line.

del 25‰, e quella passante per Altare, con pendenze massime del 30‰ (Fig. 7) [19] [20] [21].

I treni passeggeri percorrono le due tratte (via Ferrania e via Altare) in entrambi i sensi di marcia al fine di garantire un servizio omogeneo per ciascuna direzione.

Per i treni merci, il tratto da S. Giuseppe di Cairo a Savona è invece in esercizio come se fosse a doppio binario: i treni provenienti da S. Giuseppe di Cairo e diretti a Savona scendono via Altare, i treni provenienti da Savona e diretti a S. Giuseppe di Cairo salgono via Ferrania.

La linea è stata scelta in quanto collega due aree importanti per la movimentazione delle merci: il porto di Vado Ligure, con il nuovo terminal inaugurato formalmente a dicembre 2019 ed attivato gradualmente nel 2020/21, e lo scalo di Torino Orbassano, in via di ripensamento in vista del completamento negli anni '20 della linea Torino-Lione (2030). Nel seguito si descriverà come tale collegamento potrebbe potenzialmente presentare le caratteristiche di collegamento retro-portuale di cui al paragrafo precedente.

Attualmente in Italia i pochi scali marittimi in grado di

The line is electrified with a direct current (3000 V), and with a standard track gauge. The line between Trofarello and Ceva is a double-track line, while it is a single-track line from Ceva to San Giuseppe di Cairo. The line presently appears as reported in Fig. 6, in which the branches that depart from the locations along the Trofarello-Savona (Parco Doria) stretch are also shown.

Two variants of the line are present between San Giuseppe di Cairo and Savona, which are constituted by two single-track lines: the one that passes through Ferrania, with a maximum gradient of 25‰, and the one that passes through Altare, with a maximum value of 30‰ (Fig. 7) [19] [20] [21].

Passenger trains run along the two stretches (through Ferrania and through Altare), in both directions, in order to guarantee a homogeneous service in each direction.

The stretch between S. Giuseppe di Cairo and Savona is instead in operation as a double-track line for freight trains: the trains arriving from S. Giuseppe di Cairo and directed towards Savona descend through Altare, while the trains coming from Savona and directed towards S. Giuseppe di Cairo climb up through Ferrania.

This line was chosen for the analysis as it connects two important areas used for the transport of goods: the Vado Ligure port, which has a new terminal that was formally inaugurated in December 2019 and gradually activated in 2020/21, and the Turin-Orbassano hub, which at present is in the process of being radically rethought, in view of the completion of the Turin-Lyon line in the next decade (2030). The way in which this connection could present the dry-port characteristics mentioned in the previous section is described hereafter.

The very few maritime hubs in Italy that are able to manage trains within the hubs, including Savona, foresee accommodating 750 m trains with greater masses than 2000 t, in the near future, thereby allowing the unit cost of transport to be greatly reduced.

The possible growth in demand generated by the new platform dedicated to container freight traffic – with an estimated capacity 900'000 TEU/year, according to the indications of the APM Terminal manager – could make the Vado Ligure port, which is connected to Savona (and in particular to the Parco Doria hub) by a suitable railway link, a suitable candidate as an access port, in primis towards the industrialised regions of Northern Italy, and then towards France, Switzerland, Austria and Bavaria.



Figura 7 – Varianti di valico via Ferrania e via Altare.
 Figure 7 – Railway track variants through Ferrania and through Altare.

gestire treni al loro interno, tra cui Savona, prevedono per il prossimo futuro di accogliere treni di lunghezza di 750 m e massa anche superiore alle 2000 t, permettendo così di ridurre in modo significativo i costi unitari di trasporto.

La potenziale crescita di domanda generata dalla nuova piattaforma dedicata al traffico di merci containerizzate – con una capacità stimata di 900'000 TEU/anno, in base alle indicazioni del gestore APM Terminals – potrebbe far diventare il porto di Vado Ligure, collegato a Savona (in particolare allo scalo di Parco Doria) da una opportuna bretella ferroviaria, un portale d'accesso *in primis* verso la Pianura Padana, quindi verso Francia, Svizzera, Austria e Baviera.

5.2. Il pacchetto di calcolo SASTRE

Al fine di analizzare il comportamento dei convogli studiati sulla linea Torino-Savona è stato necessario usufruire dell'apporto del pacchetto di calcolo SASTRE (Simulazione ed Analisi Sistemi di Trasporto su Rotaie, sviluppato internamente presso il Politecnico di Torino) [22], dedicato alla simulazione ed all'analisi numerica dei sistemi ferroviari. Esso consente di simulare l'esercizio

5.2. The SASTRE calculation package

In order to analyse the performances of the studied trains on the Turin-Savona line, it was necessary to make use of the SASTRE package (Simulation and Analysis of Transport Systems on Tracks), completely developed within the Politecnico di Torino [22], which is dedicated to the simulation and numerical analysis of railway systems. This package allows the railway operations on a determined stretch to be simulated by taking the necessary information from three fundamental data structures:

- *infrastructure; which considers the set of topological features and information on the train routes;*
- *depo; all the information related to the rolling stock and related properties is contained within this structure;*
- *timetable; the routes utilised in the simulation are defined in this structure.*

5.2.1. The railway infrastructure

The SASTRE graphic editor allows a model of the infrastructure to be constructed utilising a representation of the infrastructure that reproduces the schematic linear planes that are used in the railway context. The features of

ferroviario su una determinata tratta prelevando le informazioni necessarie da tre strutture di dati fondamentali:

- infrastruttura; essa considera l'insieme degli elementi topologici e le informazioni sui percorsi dei treni;
- deposito; in esso vengono contenute tutte le informazioni relative al materiale rotabile ed alle sue proprietà;
- orario; in esso sono definite le corse utilizzate nella simulazione.

5.2.1. L'infrastruttura ferroviaria

L'editor grafico di SASTRE permette di costruire il modello d'infrastruttura utilizzando una rappresentazione della stessa che riproduce quella dei piani schematici lineari utilizzati in ambito ferroviario. Vengono rappresentati gli elementi dell'infrastruttura ferroviaria proiettandone le posizioni in un sistema di coordinate lineari definite dalla rispettiva progressiva chilometrica. Tale rappresentazione è utilizzata nella documentazione tecnica normalmente fornita a corredo di un'analisi di capacità (fascicoli di linea, profili longitudinali e trasversali, piani schematici di stazione); ne risulta che il caricamento dei dati nel modello viene significativamente facilitato e velocizzato, rispetto per esempio al caso in cui si utilizza una rappresentazione a grafo.

Da piani schematici, profili altimetrici e fascicoli di linea sono state dedotte le informazioni tecniche necessarie per la definizione degli elementi topologici quali:

- progressive chilometriche di ciascun punto saliente della linea (stazioni, fermate, estremi delle sezioni di blocco, segnali ecc.);
- livellette;
- raggi di curvatura;
- limiti di velocità;
- gradi di frenatura della linea;
- gradi di prestazione.

Tali informazioni, inserite tramite l'editor del pacchetto di calcolo, consentono la definizione del modello infrastrutturale, su cui verrà simulato l'esercizio (Fig. 8).

5.2.2. Il deposito

Le grandezze caratteristiche dei convogli, definite nella prima parte dello studio, vengono inserite nel "deposito", la struttura dati che contiene tutte le informazioni relative al materiale rotabile. Ciascun convoglio sarà contraddistinto dalle grandezze riportate in Tab. 5.

Per quanto riguarda il sistema considerato, complessivamente nel deposito saranno presenti:

- n. 1 convoglio merci tradizionale, atto alla circolazione sulla linea Torino-Savona;
- n. 1 convoglio viaggiatori, utilizzato per simulare il traffico passeggeri;

a railway infrastructure are represented by projecting the positions in a linear coordinate system defined by the respective progressive mileage. This representation is utilised in the technical documentation normally supplied to support a capacity analysis (line files, longitudinal and transversal layouts, schematic plans of stations); in this way, the loading of data into the model is made significantly easier and is speeded up, compared, for example, to the case in which a graphical representation is used.

The following technical information, necessary for the definition of the topological features of the considered stretch, was deduced from the schematic plans, altitude profiles and line files:

- *the progressive mileage of each salient point of the line (stations, stops, the ends of block sections, signals, etc.);*
- *the gradients;*
- *the curve radii;*
- *the speed limits;*
- *the braking degrees of the line;*
- *the circulation ranks (or route groups).*

Such information, inserted by the editor of the calculation package, allows the infrastructural model, on which the operation will be simulated, to be defined (Fig. 8).

5.2.2. The depot

The characteristic magnitudes of the train, which were defined in the first part of the study, are inserted into the "depot", that is, the data structure that contains all the information related to the rolling stock. Each train will be marked by the magnitudes reported in Tab. 5.

As far as the considered system is concerned, the following are present:

- *no. 1 traditional freight train, suitable for circulation on the Turin-Savona line;*
- *no. 1 passenger train, utilised to simulate the passenger traffic;*
- *no. 6 distributed-power trains, in agreement with the saturation scenario presented hereafter.*

5.2.3. The timetable

The analysis of the performance of the traditional freight trains and of the prototype on the line was carried out by saturating a baseline railway timetable. The considered baseline timetable was a passenger one during a weekday, and it was obtained from the official customer timetable published by Trenitalia (the main Italian operator for public rail transport) for the 2017-2018 winter period [23]. The set of indications on the passengers that travel along the whole line or a part of it represents a fixed constraint, and to all intents and purposes, a consumption of the capacity of the line that influences the possibility of programming additional passenger tracks. A total of 397 passenger indications were considered, and these were subdivided as shown in the list in Tab. 6.

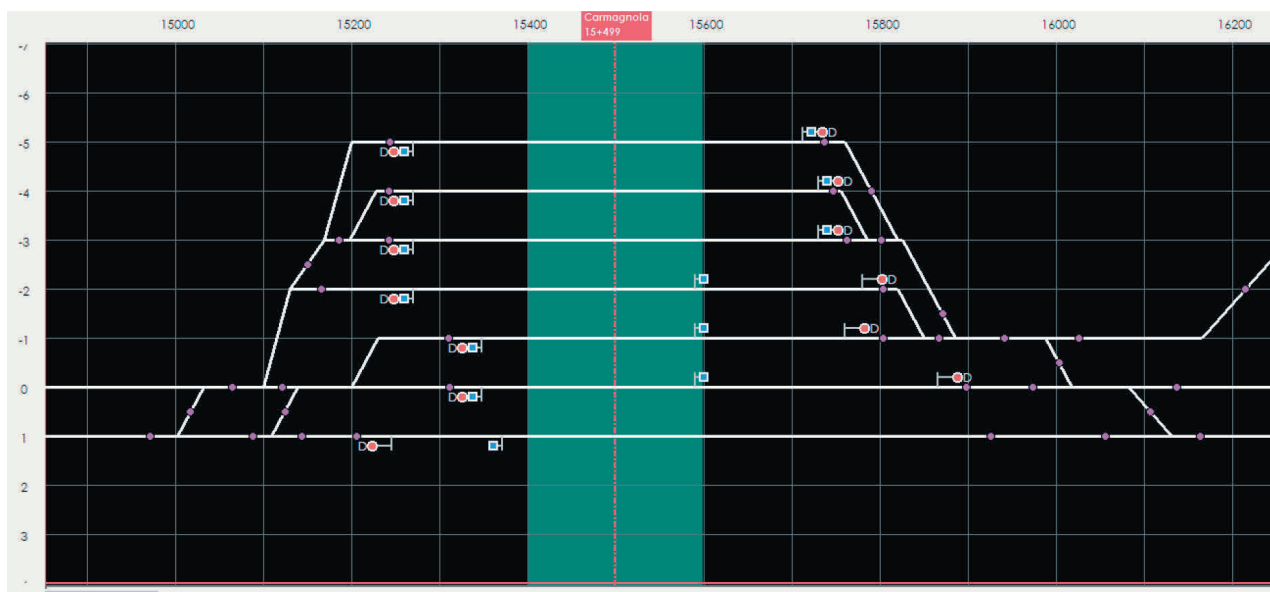


Figura 8 – Editor del pacchetto di calcolo SASTRE. In figura la stazione di Carmagnola.
Figure 8 – Editor of the SASTRE calculation package. The Carmagnola station is shown in the figure.

- n. 6 convogli merci a potenza distribuita, in accordo con gli scenari di saturazione presentati successivamente.

5.2.3. L'orario

L'analisi delle prestazioni dei treni merci tradizionali e prototipi sulla linea è eseguita mediante una saturazione di un orario ferroviario. L'orario di partenza conside-

The passenger timetable was transcribed in tabular form. Moreover, it reports, for each station or stopping point, all the trains that transit or stop in that given locality, and clearly defines:

- the identification number of the train;
- the category of the train;
- the departure time;

Tabella 5 – Table 5

Principali grandezze che caratterizzano i convogli del deposito
The main magnitudes that characterise the trains in the storage unit

Grandezze caratteristiche dei convogli del deposito <i>Characteristic magnitudes of the trains in the storage unit</i>	
Massa <i>Mass</i>	Percentuale di massa frenata <i>Percentage of braked mass</i>
Lunghezza <i>Length</i>	Tipo di impianto frenante (M/V) <i>Type of braking system (M/V)</i>
Potenza <i>Power</i>	Rendimento elettromeccanico <i>Electro-mechanical performance</i>
Velocità massima <i>Maximum speed</i>	Coefficienti di resistenza aerodinamica <i>Coefficients of aerodynamic resistance</i>
Accelerazione massima <i>Maximum acceleration</i>	Curva della caratteristica meccanica di trazione <i>Curve of the mechanical traction characteristics</i>
Decelerazione massima <i>Maximum deceleration</i>	Curva della caratteristica di frenatura pneumatica <i>Curve of the pneumatic braking characteristics</i>
Numero di carri <i>Number of wagons</i>	Curva della caratteristica di frenatura elettrodinamica <i>Curve of the electro-dynamic braking characteristics</i>
Rango di velocità <i>Speed level</i>	

- the arrival time;
- the timing point.

The latter aspect is a fundamental attribute that has to be interfaced with the railway infrastructure.

A typical passenger train, with the characteristics defined in the storage unit, will cover the passenger timetable and its related indications.

Such a train is made up of an E464 locomotive towing 6 Mean Distance External Vestibule (MDVE) carriages.

6. Results

6.1. Daily load capacities: maximisation and saturation scenarios

The performances of the electric freight train proposed above were compared with a fully loaded traditional freight train, permitted to circulate on the Turin-Savona stretch.

rato sarà quello viaggiatori in giorno feriale, ricavato dai quadri orari di stazione editi da Trenitalia per il periodo invernale 2017-2018 [23]. L'insieme delle tracce passeggeri che percorreranno l'intera linea o parte di essa rappresenterà un vincolo irremovibile e costituirà a tutti gli effetti un consumo di capacità della linea che influirà sulla possibilità di programmare tracce aggiuntive. Sono state considerate in totale 397 tracce passeggeri suddivise come elencato in Tabella 6.

L'orario viaggiatori è stato trascritto in formato tabellare e riporta, per ciascuna stazione o fermata, tutti i treni che transitano o sostano in quella data località, esplicitando:

- numero identificativo del treno;
- categoria del treno;
- orario di partenza;
- orario di arrivo;
- punto orario (*Timing point*) Quest'ultimo rappresenta l'attributo fondamentale per interfacciarsi con l'infrastruttura ferroviaria.

Ciascuna traccia dell'orario passeggeri verrà percorsa dal convoglio passeggeri tipo, con caratteristiche definite nel deposito.

Esso è costituito da un locomotore E464 trainante 6 carrozze Media Distanza Vestiboli Esterni (MDVE).

6. Risultati

6.1. Carichi utili giornalieri: scenari di massimizzazione e saturazione

Le prestazioni dell'elettrotreno merci sopra proposto vengono confrontate con un convoglio merci tradizionale, a pieno carico, ammesso alla circolazione sulla tratta Torino-Savona.

La saturazione viene effettuata mediante un algoritmo del pacchetto di calcolo SASTRE: considerando come elemento di partenza l'orario passeggeri fisso ed immutabile, lo strumento punta ad inserire il maggior numero di tracce aggiuntive negli intervalli di tempo non utilizzati. Viene effettuata una saturazione della fascia oraria 04:00:00–24:00:00 sulle tratte Torino-Savona e Savona-Torino, dapprima con convogli merci tradizionali, successivamente con diversi convogli prototipali. Si è effettuata una valutazione per scenari, identificando i parametri del convoglio maggiormente determinanti al fine di ricavare la combinazione tra di essi che porti alla massimizzazione dei carichi utili giornalieri sulla tratta. Si nota che le variabili di maggiore impatto per l'analisi sono la lunghezza del convoglio e la "densità di motorizzazione". Sulla base di esse vengono quindi definiti sei diversi prototipi, considerando tutte le combinazioni tra 3 diverse lunghezze e 2 differenti densità di motorizzazione.

Nella categoria A sono stati considerati convogli ad al-

Saturation was obtained by means of an algorithm from the SASTRE calculation package: considering the fixed and unchangeable passenger timetable as the starting point, the instrument attempts to insert as many added passenger indications as possible in the unused time intervals. The 04:00:00–24:00:00 time slot was saturated on the Turin-Savona and Savona-Turin stretches, first with traditional freight trains and then with the different prototype trains. An evaluation was made for each scenario, and the parameters of most influence were identified to obtain the combination of parameters that led to the maximisation of the daily load capacities along the stretch. It should be noted that the variables that had the greatest impact on the analyses were the length of the train and the "motorisation density". On the basis of these variables, and after considering all the combinations possible between 3 different lengths and 2 different motorisation densities, six different prototypes were defined.

Trains with a high motorisation density, with one in three wagons being motorised, were considered in category A, while trains with a low motorisation density, with one in four wagons being motorised, were considered in category B. In order to evaluate the influence of the length of the train, three types of rolling stock were identified with different lengths, for each of these categories (Tab. 7). The numbers in brackets in the table indicate, in order, the resulting length of the train and the number of wagons. It should be recalled that 324 m long type trains, with 18 connected wagons, were considered to simulate the traditional freight trains that are presently towed.

Moreover, the study was carried out considering two distinct cases of prototype train for the distributed-power train:

- for a maximum speed of 160 km/h and a load limit per wagon of 40 t (with 26 t of tare we arrive at 16.5 t/axle, which is lower than the 17.5 allowed on the French TGV lines; with 32 t of tare, 18 t/axle is instead reached);*
- for a maximum speed of 120 km/h and a load limit per wagon of 48 t.*

Tabella 6 – *Table 6*
Suddivisione e quantità dei treni passeggeri circolanti sulla linea (Torino-Savona) nell'arco di una giornata
Functional Subdivision of the passenger trains circulating on the line (Turin-Savona) throughout a day

Tipo Treno <i>Type of train</i>	Numero di tracce al giorno <i>Number of indications per day</i>
Regionale (R) <i>Regional (R)</i>	160
Regionale veloce (RV) <i>Fast regional (RV)</i>	52
Servizio Ferroviario Metropolitano (SFM) <i>Metropolitan railway service (SFM)</i>	171
Intercity (IC)	8
Eurocity (EC)	6

ta densità di motorizzazione, aventi un carro motorizzato ogni tre, mentre nella categoria B convogli a bassa densità di motorizzazione, con un carro motorizzato ogni quattro. Per ciascuna di queste categorie, al fine di valutare anche l'influenza della lunghezza del convoglio, sono stati definiti tre tipi di rotabili aventi lunghezze differenti (Tab. 7). In tabella, i numeri fra parentesi indicano, nell'ordine, la lunghezza ed il numero di carri risultanti del convoglio. Si rammenta che per simulare i convogli merci tradizionali che attualmente disimpegnano le tracce merci sono stati utilizzati dei convogli "tipo" di 324 m di lunghezza aventi 18 carri in composizione.

Inoltre, lo studio viene effettuato considerando, per il convoglio a potenza distribuita, due casi distinti di convoglio prototipo:

- con velocità massima 160 km/h e limite di carico per carro 40 t (con 26 t di tara si arriva a 16.5 t/asse, inferiori alle 17.5 ammesse sulle linee francesi per TGV; con 32 t di tara si raggiungono invece 18 t/asse);
- con velocità massima 120 km/h e limite di carico per carro 48 t.

In entrambi i casi viene eseguito un confronto tra i carichi utili trasportabili nella finestra temporale da ciascun convoglio, al fine di determinare la soluzione tecnologicamente più vantaggiosa.

6.1.1. Caso 1

Qualora l'elettrotreno merci venisse utilizzato alla velocità massima consentita, a scapito di un minor carico massimo per convoglio, si ottengono i risultati riassunti in Tab. 8.

Si nota che incrementi percentuali interessanti si ottengono per i convogli lunghi, prototipi A3 e B3, per i quali il rilevante carico utile trasportabile dal convoglio riesce a compensare il numero minore di tracce saturanti. Tale minor numero di tracce saturanti, rispetto al numero attuale di convogli merci, è dovuto all'eterotachicità delle tracce merci da programmare rispetto alla circolazione esistente (eterotachicità dovuta in primo luogo all'elevata velocità massima propria del materiale rotabile utilizzato), unitamente all'impossibilità di programmare incroci e precedenza in località altrimenti utilizzabili, a causa della lunghezza dei convogli prototipo.

Globalmente ciò può indurre a pensare che, sulla tratta considerata, l'effettiva possibilità d'incrementare la velocità massima a scapito di una riduzione del limite massimo di carico non sia eccessivamente vantaggiosa.

Inoltre, la fascia diurna e serale, dalle ore 6 alle ore 21, non consente, relativamente ai convogli prototipo, l'inserimento di tracce di alcun genere. Questo dimostra come la connessione in esame sia per lo più saturata dall'orario passeggeri in vigore. Con buona probabilità, effettuando lo studio su una parte di tratta distinta, caratterizzata da minor traffico, o su di una linea con caratteristiche differenti si potrebbero ottenere risultati ben differenti.

Tabella 7 – Table 7

I diversi scenari per convogli prototipi a potenza distribuita
The different scenarios for the distributed-power prototype trains

Scenari Scenario		Densità di motorizzazione Motorisation density	
		Bassa Low	Alta High
Lunghezza Length	Bassa Low	B1 (491, 24)	A1 (368, 18)
	Intermedia Intermediate	B2 (655, 32)	A2 (553, 27)
	Alta High	B3 (778, 38)	A3 (737, 36)

A comparison was made, for both cases, by comparing the transportable load capacities in the time slot of each train, in order to determine the most technologically advantageous solution.

6.1.1. Case 1

Whenever the electric freight train was considered to have been used at the maximum permitted speed, at the expense of a lower maximum load per train, the results summarised in Tab. 8 were obtained.

It may be observed that interesting percentage increases can be obtained for the long trains, that is, prototypes A3 and B3, for which the relevant transportable load capacity of the train is able to compensate for the lower number of saturating paths. This lower number of saturated routes (paths), compared to the current number of freight trains, is due to the speed-heterogeneity of the freight paths that have to be programmed, compared to the current circulation (a heterogeneity that is above all due to the elevated maximum speed of the utilised rolling stock), together with the impossibility of programming crossings and overtakings between trains in otherwise highly-used locations, because of the length of the prototype trains.

Overall, this could induce one to think that, on the considered stretch, the actual possibility of increasing the maximum speed, at the expense of a reduction of the maximum load limit, is not particularly advantageous.

Furthermore, the daily and evening slot, that is, from 6:00 till 21:00, does not allow routes of any type to be inserted for the prototype train. This result demonstrates that the stretch under examination is mostly saturated by the passenger timetable currently in force. In all probability, if the study were to be conducted on a distinct part of the stretch, characterised by less traffic, or on a line with different characteristics, very different results would be obtained.

6.1.2. Case 2

Another analysis was performed, with reference to the same prototypes presented in Case 1, this time just varying the load of each wagon, which was increased to 48 t, and the maximum speed that could be reached, which was reduced to 120 km/h. In this way, a different use of the dis-

Tabella 8 – Table 8

Tracce saturanti e tonnellate trasportabili in entrambe le direzioni e scostamento rispetto ai treni merci tradizionali (velocità massima prototipo 160 km/h, limite di carico carro Sacca60 40 t)

Saturated tracks and transportable tonnes in both directions and difference with respect to traditional freight trains (maximum speed of the prototype train 160 km/h, load limit of the Sacca60 wagon 40 t)

Tracce saturanti e tonnellate utili trasportabili totali in entrambe le direzioni (velocità massima rotabili prototipo 160 km/h, limite di carico carro Sacca60 40 t) <i>Saturated tracks and total transportable load capacity tonnes in both directions (maximum speed of the prototype train 160 km/h, load limit of the Sacca60 wagon 40 t)</i>							
	Merci Tradizionale <i>Traditional freight train</i>	A1	A2	A3	B1	B2	B3
N° carri <i>No. of wagons</i>	18	18	27	36	24	32	38
Tracce totali nella fascia oraria 04:00:00-24:00:00 da Torino a Savona <i>Total tracks in the 04:00:00-24:00:00 time slot from Turin to Savona</i>	8	6	4	4	6	4	4
Tracce totali nella fascia oraria 04:00:00-24:00:00 da Savona a Torino <i>Total tracks in the 04:00:00-24:00:00 time slot from Savona to Turin</i>	6	5	5	5	5	5	5
Tracce totali nella fascia oraria 04:00:00-24:00:00 in entrambe le direzioni <i>Total tracks in the 04:00:00-24:00:00 time slot in both directions</i>	14	11	9	9	11	9	9
Tonnellate utili trasportabili da singolo convoglio (t) <i>Load capacity in tonnes transportable by a single train (t)</i>	832	680	1040	1400	920	1240	1560
Tonnellate utili trasportabili totali da Torino a Savona (t) <i>Total load capacity in tonnes transportable from Turin to Savona (t)</i>	6656	4080	4160	5600	5520	4960	6240
Tonnellate utili trasportabili totali da Savona a Torino (t) <i>Total load capacity in tonnes transportable from Savona to Torino (t)</i>	4992	3400	5200	7000	4600	6200	7800
Tonnellate utili trasportabili totali in entrambe le direzioni (t) <i>Total load capacity in tonnes transportable in both directions (t)</i>	11648	7480	9360	12600	10120	11160	14040
Scostamento rispetto alle tonnellate trasportabili totali del convoglio merci tradizionale (%) <i>Difference with respect to the total transportable tonnes of the traditional freight train (%)</i>		-35,8%	-19,6%	8,2%	-13,1%	-4,2%	20,5%

6.1.2. Caso 2

Si è effettuata una seconda analisi riferita agli stessi prototipi presentati nel caso 1, facendo variare esclusivamente il carico di ciascun carro, incrementato a 48 t, e la velocità massima raggiungibile, ridotta a 120 km/h. Si considera perciò un diverso utilizzo dei convogli a potenza distribuita in linea con quanto espresso dai limiti di carico del carro Sacca60. La diminuzione di velocità avviene in virtù del maggior carico trasportabile da ciascun carro. Le lunghezze dei convogli restano invariate.

In particolare, la configurazione con velocità massima 120 km/h consente di sfruttare in maggior misura il materiale rotabile, anche rispetto ad un treno merci tradizionale, mediante una maggiore percentuale di carico utile rispetto alla massa complessiva, da cui deriva una maggiore efficienza di trasporto.

Come si evince dai risultati (Tab. 9) (Tab. 10) (Tab. 11) (Tab. 12) (Tab. 13), l'aumento del limite di carico a scapito di un contenimento della velocità massima porta ad evidenti benefici in termini di tonnellate trasportabili sulla tratta.

tributed-power train was considered, in line with the limits expressed for the Sacca60 wagon. The decrease in speed occurs as a result of the greater transportable load of the wagons. The lengths of the trains were left unchanged.

The configuration with a maximum speed of 120 km/h allows a greater advantage to be taken of the rolling stock, with respect to a traditional freight train, as a result of a greater percentage of load capacity compared to the overall mass, from which a greater transport efficiency is derived.

As can be deduced from the results (Tab. 9) (Tab. 10) (Tab. 11) (Tab. 12) (Tab. 13), the increase in the load capacity limit, at the expense of a containment of the maximum speed, leads to evident benefits, in terms of transportable tonnes along the stretch.

In the analysed case, optimal performances have been found for the long B3 and A3 prototypes, and good results have also been found for the B2 and B1 prototypes, while values that are in line with the traditional freight train have been found for the remaining prototypes, that is, A1 and

Tabella 9 – Table 9

Tracce saturanti e tonnellate trasportabili in entrambe le direzioni e scostamento rispetto ai treni merci tradizionali (velocità massima prototipo 120 km/h, limite di carico carro Sacca60 48 t)

Saturated tracks and transportable tonnes in both directions and difference with respect to traditional freight trains (maximum speed of the prototype train 120 km/h, load limit of the Sacca60 wagon 48 t)

Tracce saturanti e tonnellate utili trasportabili totali in entrambe le direzioni (velocità massima rotabili prototipi 120 km/h, limite di carico carro Sacca60 48 t) <i>Saturating tracks and total transportable load capacity in tonnes in both directions (maximum speed of the prototype train 120 km/h, load limit of the Sacca60 wagons 48 t)</i>							
	Merci Tradizionale <i>Conventional freight train</i>	A1	A2	A3	B1	B2	B3
N° carri <i>No. of wagons</i>	18	18	27	36	24	32	38
Tracce totali nella fascia oraria 04:00:00-24:00:00 da Torino a Savona <i>Total tracks in the 04:00:00-24:00:00 time slot from Turin to Savona</i>	8	7	4	4	7	4	4
Tracce totali nella fascia oraria 04:00:00-24:00:00 da Savona a Torino <i>Total tracks in the 04:00:00-24:00:00 time slot from Savona to Turin</i>	6	6	4	5	6	5	5
Tracce totali nella fascia oraria 04:00:00-24:00:00 in entrambe le direzioni <i>Total tracks in the 04:00:00-24:00:00 time slot in both directions</i>	14	13	8	9	13	9	9
Tonnellate utili trasportabili da singolo convoglio (t) <i>Load capacity in tonnes transportable by a single train (t)</i>	832	816	1248	1680	1104	1488	1872
Tonnellate utili trasportabili totali da Torino a Savona (t) <i>Total load capacity in tonnes transportable from Turin to Savona (t)</i>	6656	5712	4992	6720	7728	5952	7488
Tonnellate utili trasportabili totali da Savona a Torino (t) <i>Total load capacity in tonnes transportable from Savona to Torino (t)</i>	4992	4896	4992	8400	6624	7440	9360
Tonnellate utili trasportabili totali in entrambe le direzioni (t) <i>Total load capacity in tonnes transportable in both directions (t)</i>	11648	10608	9984	15120	14352	13392	16848
Scostamento rispetto alle tonnellate trasportabili totali del convoglio merci tradizionale (%) <i>Difference with respect to the total transportable tonnes of the traditional freight train (%)</i>		-8,9%	-14,3%	29,8%	23,2%	15,0%	44,6%

Nel caso analizzato si riscontrano ottime prestazioni per quanto riguarda i convogli prototipo lunghi B3 e A3, buoni risultati anche per i prototipi B2 e B1 e valori in linea con il treno merci tradizionale per i restanti A1 e A2: la combinazione tra elevata lunghezza e bassa densità di motorizzazione produce valori interessanti.

In contrasto con valori intuitivi, la categoria B ottiene, sia per la configurazione di carico a 40 t sia per quella a 48 t, risultati più convincenti rispetto alla categoria A: la scelta di utilizzare rotabili con alta densità di motori non appare dunque efficace. Tale evidenza può essere dovuta al fatto che le migliori prestazioni in fase di trazione e frenatura, siano maggiormente evidenti sui treni passeggeri a causa delle fasi transitorie del moto in corrispondenza delle fermate obbligate. L'utilizzo di un treno merci che possa sostare al massimo in tre località e che tenda a prediligere un percorso diretto tenderà a sfruttare meno l'effetto delle fasi transitorie di accelerazione e decelerazione.

Volendo definire il convoglio che porti a migliori incrementi di capacità, rispettando la flessibilità di eserci-

A2: the combination of greater length and low motorisation density has produced interesting values.

In disagreement with the intuitive values, category B has obtained more convincing results than category A, for both the 40 t load configuration and for the 48 t one. The decision to use a rolling stock with a high engine density does not in fact appear efficacious. This evidence may be due to the fact that the best performances, during the traction and braking phases, are more evident for the passenger trains because of the transitory movement phases in correspondence to the obligatory braking. The use of a freight train that can stop at most in three locations, and which tends to favour a direct route, will tend to take less advantage of the effect of the transitory acceleration and deceleration phases.

As the aim of this work was to define a train with an increased capacity, with respect to operation flexibility, the choice seems to fall on the B3 prototype, in which the greater length, in accordance with a discrete number of engine wagons, leads to increases in capacity of 44.6% and of 20.5%, for load limits of 48 t and 40 t, respectively.

zio, la scelta sembra ricadere sul prototipo B3, nel quale l'elevata lunghezza in accordo con un discreto numero di carri motori portano ad ottenere incrementi di capacità del 44,6% e del 20,5%, rispettivamente per limiti di carico di 48 t e 40 t.

Va riconosciuto che il prototipo B3 presenta una potenza massima assorbita durante la marcia decisamente superiore a quella assorbita dal convoglio merci tradizionale, evidenziando come, in un'analisi simile, sia necessario interfacciarsi con il gestore dell'infrastruttura per porre in discussione l'aumento dei limiti di assorbimento di corrente elettrica attualmente presenti sulla linea.

L'elevata lunghezza è correlata, nell'esercizio reale, all'impossibilità di sostare nelle stazioni della linea per consentire incroci e precedenza non programmati dovuti ad un'eventuale perturbazione dell'orario. L'incremento del modulo di stazione in un sufficiente numero di località intermedie risulta dunque in ogni caso un elemento imprescindibile per poter effettuare il servizio in questione.

It should be recognised that the B3 prototype presents a clearly superior maximum absorbed power than the power consumed by the traditional freight train, thus pointing out how, in a similar analysis, it is necessary to work hand by hand with the infrastructure manager to question the increase in the consumption limits of the electric current now present along the line.

The elevated length, under real operation conditions, is correlated with the impossibility of stopping in the stations along the line to allow unplanned crossings and to give right of way due to a possible perturbation of the timetable. However, the increase in the station module to a sufficient number of intermediate locations results to be an essential feature in order to be able to introduce the service in question.

6.2. Reduction of the travel times

The travel time along the stretch from Savona (Parco Doria) to Trofarello (Turin) and vice versa, represents an

Tabella 10 – Table 10

Tempi di percorrenza sulla tratta Torino-Savona di un convoglio passeggeri, un convoglio merci tradizionale e convogli prototipi aventi limite di carico di 40 t con velocità limite dei carri di 160 km/h

Travel times on the Turin-Savona stretch of a passenger train, a traditional freight train and a prototype train with a load of 40 t and a limited speed of the wagons of 160 km/h

Tempi di percorrenza tratta Torino-Savona <i>Travel times along the Turin-Savona stretch</i>					
Tipo treno <i>Type of train</i>	Tempo di percorrenza [s] <i>Travel time [s]</i>	Tempo di percorrenza [hh:mm:ss] <i>Travel time [hh:mm:ss]</i>	Risparmio tempo di percorrenza rispetto a Merci Tradizionale [s] <i>Time saved compared to traditional freight trains [s]</i>	Risparmio tempo di percorrenza rispetto a Merci Tradizionale [hh:mm:ss] <i>Time saved compared to traditional freight trains [hh:mm:ss]</i>	Variazione percentuale tempo di percorrenza rispetto a merci tradizionale [%] <i>Percentage variation of the travel time compared to traditional freight trains [%]</i>
Passeggeri <i>Passengers</i>	5090	01:24:50			
Prototipo A1 <i>Prototype A1</i>	4440	01:14:00	1575	00:26:15	26,2%
Prototipo A2 <i>Prototype A2</i>	4469	01:14:29	1546	00:25:46	25,7%
Prototipo A3 <i>Prototype A3</i>	4486	01:14:46	1529	00:25:29	25,4%
Prototipo B1 <i>Prototype B1</i>	4517	01:15:17	1498	00:24:59	24,9%
Prototipo B2 <i>Prototype B2</i>	4541	01:15:41	1474	00:24:34	24,5%
Prototipo B3 <i>Prototype B3</i>	4555	01:15:55	1460	00:24:20	24,3%
Merchi tradizionale <i>Traditional freight train</i>	6015	01:40:15			

6.2. Riduzione dei tempi di percorrenza

Il tempo di percorrenza della tratta da Savona Parco Doria a Trofarello (Torino) e viceversa rappresenta un importante parametro di valutazione. Il tempo di percorrenza è stato assunto pari alla somma dei tempi di viaggio richiesti da una località alla successiva, non considerando i tempi di sosta e fermata.

In quest'analisi non si valuta il vincolo dell'orario passeggeri, bensì gli unici limiti sono imposti dalle regole di circolazione della linea, dalle prestazioni del materiale rotabile e dalle caratteristiche del freno, che influenzano, come mostrato dai profili di marcia, sulla velocità massima raggiungibile incompatibile con la marcia in sicurezza.

È bene specificare che la velocità massima di percorrenza di ciascun tratto sarà data dal valore minimo tra il limite di velocità imposto dal tracciato, la velocità massima raggiungibile dal materiale rotabile fissata una certa

important evaluation parameter. The travel time was considered equal to the sum of the travel times necessary to travel from one locality to the next, without considering the stopover and short stop times.

The constraint pertaining to the passenger timetable was not assessed in this analysis, and the only limits were those imposed by the circulation rules of the line, by the performances of the rolling stock and by the characteristics of the braking system, which, as shown by the running profiles, when taken together, influence the maximum speed that can be reached, which is incompatible with the safety running speed.

It should be pointed out that the maximum travelling time of each stretch will be based on the minimum value between the imposed speed limit on the stretch, the maximum speed that can be reached by the rolling stock for a certain fixed load configuration and the maximum speed imposed starting from the braking degree of the line, but also by the percentage of towed mass.

Tabella 11 – Table 11

Tempi di percorrenza sulla tratta Savona-Torino di un convoglio passeggeri, un convoglio merci tradizionale e convogli prototipi aventi limite di carico di 40 t con velocità limite dei carri di 160 km/h

Travel times on the Savona-Turin stretch of a passenger train, a traditional freight train and a prototype train with a load of 40 t and a limited speed of the wagons of 160 km/h

Tempi di percorrenza tratta Torino-Savona <i>Travel times along the Turin-Savona stretch</i>					
Tipo treno <i>Type of train</i>	Tempo di percorrenza [s] <i>Travel time [s]</i>	Tempo di percorrenza [hh:mm:ss] <i>Travel time [hh:mm:ss]</i>	Risparmio tempo di percorrenza rispetto a Merci Tradizionale [s] <i>Time saved compared to traditional freight trains [s]</i>	Risparmio tempo di percorrenza rispetto a Merci Tradizionale [hh:mm:ss] <i>Time saved compared to traditional freight trains [hh:mm:ss]</i>	Variazione percentuale tempo di percorrenza rispetto a merci tradizionale [%] <i>Percentage variation of the travel time compared to traditional freight trains [%]</i>
Passeggeri <i>Passengers</i>	4861	01:21:01			
Prototipo A1 <i>Prototype A1</i>	5344	01:29:04	1116	00:18:36	17,3%
Prototipo A2 <i>Prototype A2</i>	5384	01:29:44	1076	00:17:56	16,7%
Prototipo A3 <i>Prototype A3</i>	5405	01:30:05	1055	00:17:35	16,3%
Prototipo B1 <i>Prototype B1</i>	5706	01:35:06	754	00:12:34	11,7%
Prototipo B2 <i>Prototype B2</i>	5705	01:35:05	755	00:12:35	11,7%
Prototipo B3 <i>Prototype B3</i>	5697	01:34:57	763	00:12:43	11,8%
Merci tradizionale <i>Traditional freight</i>	6460	01:47:40			

Tabella 12 – Table 12

Tempi di percorrenza sulla tratta Torino-Savona di un convoglio passeggeri, un convoglio merci tradizionale e convogli prototipi aventi limite di carico di 48 t con velocità limite dei carri di 120 km/h
Travel times on the Turin-Savona stretch of a passenger train, a traditional freight train and a prototype train with a load of 48 t and a limited speed of the wagons of 120 km/h

Tempi di percorrenza tratta Torino-Savona <i>Travel times along the Turin-Savona stretch</i>					
Tipo treno <i>Type of train</i>	Tempo di percorrenza [s] <i>Travel time</i> [s]	Tempo di percorrenza [hh:mm:ss] <i>Travel time</i> [hh:mm:ss]	Risparmio tempo di percorrenza rispetto a Merci Tradizionale [s] <i>Time saved compared to traditional freight trains</i> [s]	Risparmio tempo di percorrenza rispetto a Merci Tradizionale [hh:mm:ss] <i>Time saved compared to traditional freight trains</i> [hh:mm:ss]	Variazione percentuale tempo di percorrenza rispetto a merci tradizionale [%] <i>Percentage variation of the travel time compared to traditional freight trains</i> [%]
Passeggeri <i>Passengers</i>	5095	01:24:55			
Prototipo A1 <i>Prototype A1</i>	4780	01:19:40	1242	00:20:42	20,6%
Prototipo A2 <i>Prototype A2</i>	4810	01:20:10	1212	00:20:12	20,1%
Prototipo A3 <i>Prototype A3</i>	4826	01:20:26	1196	00:19:56	19,9%
Prototipo B1 <i>Prototype B1</i>	4850	01:20:50	1172	00:19:32	19,5%
Prototipo B2 <i>Prototype B2</i>	4867	01:21:07	1155	00:19:15	19,2%
Prototipo B3 <i>Prototype B3</i>	4885	01.21:25	1137	00:18:57	18,9%
Merchi tradizionale <i>Traditional freight train</i>	6022	01:40:22			

configurazione di carico, e la velocità massima imposta a partire dal grado di frenatura della linea nonché dalla percentuale di massa frenata.

In prima analisi si considerano i convogli composti da carri Sacca60 aventi limite di carico fissato a 40 t e velocità massima di 160 km/h.

Si nota come si riescono ad ottenere interessanti decrementi dei tempi di percorrenza sia sulla tratta Torino – Savona che sulla tratta Savona – Torino, come presentato in Tab. 10 e Tab. 11.

In entrambi i casi, risultati leggermente migliori si ottengono per i prototipi con alta densità di motorizzazione, sebbene i convogli di categoria B siano caratterizzati, soprattutto sulla tratta Torino-Savona, da tempi molto simili a quelli della categoria A.

Globalmente le migliori apportate agli impianti del convoglio prototipo si traducono in vantaggi rilevanti con risparmi di tempo di percorrenza sino al 26%. Oltretutto,

In the preliminary analysis, trains composed of Sacca60 wagons, with a load limit fixed at 40 t and the maximum speed at 160 km/h were considered.

It can be noted that interesting decreases of the travel times can be achieved on both the Turin-Savona stretch and on the Savona – Turin stretch, as shown in Tab. 10 and Tab. 11.

In both cases, slightly better results are obtained for the prototype with a high motorisation density, although the category B trains are characterised by similar times to those of category A, above all on the Turin-Savona stretch.

Overall, the improvements introduced by the systems of the prototype train are translated into relevant advantages with travel time savings of up 26%. Furthermore, the lower travel time associated with the greater load capacity relative to the longer trains, leads to remarkable flow values.

The travel times of the trains that were utilised for the second set of saturation scenarios, which are different from

Tabella 13 – Table 13

Tempi di percorrenza sulla tratta Savona-Torino di un convoglio passeggeri, un convoglio merci tradizionale e convogli prototipi aventi limite di carico di 48 t con velocità limite dei carri di 120 km/h
Travel times on the Savona-Turin stretch of a passenger train, a traditional freight train and a prototype train with a load of 48 t and a limited speed of the wagons of 120 km/h

Tempi di percorrenza tratta Torino-Savona <i>Travel times along the Turin-Savona stretch</i>					
Tipo treno <i>Type of train</i>	Tempo di percorrenza [s] <i>Travel time [s]</i>	Tempo di percorrenza [hh:mm:ss] <i>Travel time [hh:mm:ss]</i>	Risparmio tempo di percorrenza rispetto a Merci Tradizionale [s] <i>Time saved compared to traditional freight trains [s]</i>	Risparmio tempo di percorrenza rispetto a Merci Tradizionale [hh:mm:ss] <i>Time saved compared to traditional freight trains [hh:mm:ss]</i>	Variazione percentuale tempo di percorrenza rispetto a merci tradizionale [%] <i>Percentage variation of the travel time compared to traditional freight trains [%]</i>
Passeggeri <i>Passengers</i>	4861	01:21:01			
Prototipo A1 <i>Prototype A1</i>	5276	01:27:56	1184	00:19:44	18,3%
Prototipo A2 <i>Prototype A2</i>	5334	01:28:54	1126	00:18:46	17,4%
Prototipo A3 <i>Prototype A3</i>	5357	01:29:17	1103	00:18:23	17,1%
Prototipo B1 <i>Prototype B1</i>	5656	01:34:16	804	00:13:24	12,4%
Prototipo B2 <i>Prototype B2</i>	5676	01:34:36	784	00:13:04	12,1%
Prototipo B3 <i>Prototype B3</i>	5677	01:34:37	783	00:13:03	12,1%
Merici tradizionale <i>Traditional freight train</i>	6460	01:47:40			

il minor tempo di percorrenza associato alla maggior capacità di carico relativa ai convogli più lunghi, porta a raggiungere valori di portata notevoli.

Per maggiore completezza si riportano i tempi di percorrenza dei convogli utilizzati per il secondo insieme di scenari di saturazione, differenti dai precedenti per velocità massima raggiungibile dai carri Sacca60 (120 km/h) e carico utile posto a 48 t, come esposto in Tab. 12 e Tab. 13 relativamente alle due direzioni.

Anche nel caso seguente si nota una riduzione dei tempi di percorrenza più o meno marcata a seconda dei prototipi. Sulla tratta Torino-Savona tutti i prototipi si comportano in maniera simile, mentre in direzione opposta la differenza sulla densità di motorizzazione influisce sui risultati: i prototipi di categoria A sono contraddistinti da tempi di percorrenza inferiori rispetto a quelli di categoria B. Il convoglio prototipo, nel percorrere i tratti di linea in forte discesa fa un uso limitato della frenatura a denti di sega, ottenendo benefici in termini di tempo di percorrenza e di usura degli organi.

the previous ones as far as the maximum speed that can be reached by the Sacca60 wagons (120 km/h) and the load capacity (48 t) are concerned, as shown in Tab. 12 and Tab. 13 relative to the two directions, are also given as further information.

In the following case, a reduction of the travel times, which is more or less pronounced, can be noted, according to the prototype. All the prototypes on the Turin-Savona stretch behave in a similar way, while the difference in motorisation density influences the result in the opposite direction: the category A prototypes are marked by lower travel times than the category B ones. The prototype train, when running on the stretches on a line with steep descents, makes less use of saw-tooth braking, thereby obtaining benefits in travel time terms and of wear of the components.

7. Conclusions

A new type of rolling stock for the transport of any kind of goods, which is suitable for a mixed use on traditional networks and on high-speed lines, has been presented in this paper. This rolling stock is probably currently in-

7. Conclusioni

Nell'articolo è stato presentato un nuovo tipo di materiale rotabile per il trasporto di qualsiasi genere di merci e ad uso promiscuo: rete tradizionale e ad alta velocità. Si tratta di materiale rotabile oggi forse inaccessibile a gran parte del mercato perché il salto tecnologico rispetto al parco esistente da decenni è considerevole, seppure nient'affatto rivoluzionario se si guarda alle esperienze consolidate nel trasporto persone. D'altronde non ci si può attendere diversamente se per 60-70 anni, con eccezione per poche tipologie di treni merci, non si è investito nel rinnovare il parco così da mantenere la competitività che la ferroviaria aveva un tempo; al contempo si è investito sui veicoli pesanti stradali, che hanno acquisito il dominio su molte tipologie di merci, man mano diventate più leggere, deperibili, da monitorare, da non sottoporre a sbalzi termici, fino a costituire la grande maggioranza del traffico, quasi inaccessibile ai carri ferroviari ereditati tal quali dal secondo dopoguerra.

In un possibile scenario futuro, si suppone, potranno coesistere tre tipologie di convogli merci. Il convoglio merci tradizionale potrà essere utilizzato per il trasporto di materiale "povero", solitamente trasportato sfuso e per cui è pressoché impossibile una containerizzazione, ad esempio granaglie, minerali, legname, ecc. I rilevanti carichi per asse dovuti all'alta densità della merce trasportata non consentirebbero il raggiungimento di velocità elevate secondo quanto imposto dai carri stessi. Contestualmente i carichi leggeri associati al trasporto postale o di pacchi, sempre in crescita grazie agli acquisti in rete (e-commerce) ed alla esigenza immediata dei beni, potranno viaggiare su treni ad alta velocità adibiti allo scopo, seguendo la linea già tracciata dal TGV Postal.

Qualora la massa scarsa trasportata non consentisse la saturazione di un intero treno si potranno prevedere carrozze adibite al trasporto postale inserite in treni convogli ad alta velocità, ricalcando l'esempio delle carrozze postali utilizzate in passato.

Il treno merci a potenza distribuita sarà a questo punto di fondamentale importanza per il trasporto combinato di UTI, intercettando la domanda generata nei porti, interporti e nei grossi poli industriali nonché della logistica. I vantaggi saranno riscontrabili nell'acquisizione di un bacino potenziale di traffico a stima tre volte superiore a quello attuale, nella risposta a trasferimenti di prodotti più rapidi e non solo per il commercio elettronico, nelle prestazioni in fase di trazione e frenata, nel possibile utilizzo sui corridoi TEN-T, nella possibilità di tele-diagnosi e nell'allungamento del convoglio sino a valori ipotetici di 750 m, in linea con quanto previsto all'Unione Europea.

accessible to most of the market, because the jump in technology, with respect to the current fleet that has existed for decades, is considerable, although not exactly revolutionary, if the consolidated experience of passenger transport is contemplated. On the other hand, nothing else can be expected, considering that, with the exception of a few types of freight trains, there have been no investments to renew the railway fleet in order to maintain the competitiveness that the railway once had over a period of 60-70 years. At the same time, investments have been made in heavy-duty road vehicles, which, since most of freight has become lighter and lighter (i.e. fewer construction materials, more consumables), have acquired dominance in the transport of many types of goods, including perishable goods, which have to be monitored and not be subjected to temperature fluctuations, so much so that they have taken on an overwhelming role in the transport of certain goods, which are almost inaccessible to the railway wagons that were inherited, in an unaltered state, from just after the second World War.

In a possible future scenario, it may be supposed that three types of freight trains could exist side by side. Traditional freight trains could be used for the transport of "poor" material, which is usually transported loose and for which it is almost impossible to foresee containerisation, for example, grain, mining products, wood, etc. The relevant loads per axle, due to the high density of transported goods, would not allow an elevated speed to be reached, as imposed by the wagons themselves. Contextually, the light loads associated with postal traffic or that of parcels, which is continuously growing, thanks to e-commerce and to the immediate need for goods, could travel on high-speed trains dedicated to this purpose, like those created in the past for the TGV postal services.

Whenever the limited transported mass does not allow an entire train to be saturated, it would be possible to foresee carriages dedicated to postal transport being included in high-speed trains, following the example of the postal carriages used in the past.

At this point, the distributed-power freight train will be of fundamental importance for the combined transport of ITUs, as it will be able to intercept the demand generated not only in the ports, freight villages (or logistics platforms) and in the large industrial areas, but also by the logistics. The advantages that can be obtained are related to:

- the acquisition of a possible traffic basin, which has been estimated to be three times greater than the present one, in response to the need to transfer products more quickly and not only for electronic commerce;*
- the traction and braking performances;*
- the possible use of TEN-T corridors;*
- the possibility of remote-diagnostics;*
- the lengthening of trains up to a hypothetical length of 750 m, in line with what has been foreseen by the European Union.*

BIBLIOGRAFIA - REFERENCES

- [1] Commissione Europea (2011), "Libro Bianco sui Trasporti. Tabella di marcia verso uno spazio unico europeo dei trasporti – per una politica dei trasporti competitiva e sostenibile", Lussemburgo: Uffici di Pubblicazione dell'Unione Europea.
- [2] M. CAVAGNARO (2014), "Un progetto merci per la rete ferroviaria europea", *Ingegneria Ferroviaria*, Ottobre, Num. 10, Pag. 825.
- [3] B. DALLA CHIARA B., M. PELLICELLI (2011), "Sul costo del trasporto combinato strada-rotaia", *Ingegneria Ferroviaria*, 66(11).
- [4] V. TORRIERI (2007), "Tecnica ed economia dei trasporti", Edizioni scientifiche italiane Napoli.
- [5] B. DALLA CHIARA (2018), "Sistemi di trasporto intermodali. Progettazione ed esercizio" EGAF Edizioni.
- [6] A. NUZZOLO, P. COPPOLA, "Limiti e prospettive di sviluppo del trasporto ferroviario delle merci", FrancoAngeli Milano.
- [7] E. PRINCIPE (2004), "Nozioni sui veicoli FS per trasporto merci", Editrice Veneta Vicenza.
- [8] Direzione generale F.S. (1969), "I nostri carri per le vostre merci", F.S., Roma.
- [9] Rete Ferroviaria Italiana (RFI) (2007) "Prefazione Generale all'Orario di Servizio", edizione 1963, ristampa.
- [10] E. PRINCIPE (2008), "Il veicolo ferroviario", CIFI Roma, 2008.
- [11] R. PANAGIN (2006), "Costruzione del veicolo ferroviario" CIFI Roma.
- [12] R. GRIMALDI R., G. MALAVASI (2015), "*Potentials of technological innovations with respect to rail freight transport performance in Europe*", *Ingegneria Ferroviaria*, 70(6).
- [13] Prima S.R.L. (2012), "Presentazione Tecnica Carro Intermodale" "Sacca60", Firenze.
- [14] G. TROCHE (2005), "*High-speed rail freight*", Sub-report in Efficient train systems for freight transport, Report 0512, KTH-Stockholm Railway Group, 1-93.
- [15] Rete Ferroviaria Italiana (RFI) (2007), "Istruzioni sull'esercizio del freno continuo automatico per i convogli di RFI", Edizione 1966, Ristampa.
- [16] R.V.D. MEULEN (2001), "*Strategies for freight train integrated ECP braking plus distributed power*", Proceedings of the World Congress on Railway Research, 1-12.
- [17] F. GIGLIO (2005), "L'incremento della lunghezza dei convogli ferroviari: treni per trasporto merci", Politecnico di Torino.
- [18] A. MINOIA (2017), "Appunti del corso di Trazione Elettrica", Università degli studi di Pavia.
- [19] N. COVIELLO, F. PALOTTO (2016), "Una valutazione della capacità delle linee ferroviarie per i porti di Savona e Vado: soluzioni per effettuare servizi merci efficaci", *Ingegneria Ferroviaria*, 71(4).
- [20] Rete Ferroviaria Italiana (RFI) (2003), "Fascicolo di linea" n. 8.
- [21] Rete Ferroviaria Italiana (RFI) (2003), "Fascicolo di linea" n. 75.
- [22] N. COVIELLO (2018), "Manuale d'uso e presentazione del pacchetto di calcolo SASTRE" (Simulazione ed Analisi Sistemi di Trasporto su Rotaie), Politecnico di Torino, 2018.
- [23] Trenitalia (2018) "Orario passeggeri invernale".