



Valutazioni di capacità basate sull'orario: analisi di una ferrovia suburbana a singolo binario

Timetable-based capacity evaluations: analysis of a sub-urban single-track railway

Nicola COVIELLO^(*)

Sommario - L'articolo presenta un approccio originale per effettuare la valutazione della capacità di sistemi ferroviari, basato sulla generazione ed analisi automatiche di orari fattibili. Questo metodo fa uso di un modello microscopico dei sistemi ferroviari, utilizzato per simulare le corse dei treni ed il contestuale funzionamento del sistema di segnalamento. Le tracce così simulate sono impiegate per assemblare un insieme di dati di ingresso per un algoritmo di programmazione che genera orari privi di conflitti, i quali sono successivamente analizzati al fine di delineare il grado di utilizzo della capacità disponibile congiuntamente al modo in cui detta capacità è impiegata. Il modello ed il metodo così descritti sono applicati ad un caso di studio reale, costituito da una ferrovia a singolo binario piemontese. Dato uno scenario di riferimento di base, viene presa in considerazione una serie di migliorie infrastrutturali e d'esercizio. I conseguenti incrementi di capacità sono valutati in termini di riduzione dei tempi di viaggio totali dei treni rispetto allo scenario di riferimento. I risultati sono analizzati e discussi, evidenziando le potenzialità del metodo presentato per effettuare stime di capacità efficaci ed utili per conseguire un miglior impiego dei sistemi ferroviari.

1. Introduzione

1.1. Scopi ed obiettivi della ricerca

In questo articolo viene presentata un'analisi di capacità effettuata sulla Ferrovia Canavesana, linea che connette le città di Settimo Torinese, Rivarolo e Pont Canavese in Piemonte (Italia). Questa linea è costituita da un tracciato a singolo binario di proprietà della Regione Piemonte e gestito ed utilizzato dall'azienda pubblica GTT (Gruppo Torinese Trasporti), rispettivamente attraverso le due divisioni GTT - Infrastruttura (Gestore dell'Infrastruttura) e GTT - Trasporto (Operatore Ferroviario). Tale ferrovia rappresenta un'importante arteria di collegamento - grazie ad un servizio passeggeri cadenzato di ti-

Summary - The paper presents an original approach to perform capacity assessments of railway systems, based on the automatic generation and evaluation of feasible timetables. This method relies on a microscopic model of railway systems, used to simulate the train runs and the operation of the signalling system. The resulting simulated train paths are utilised to arrange the input dataset for a scheduling algorithm which generates conflict-free timetables, which are then analysed in order to point out how and how much capacity is consumed. The described method and model are applied to a real case study, provided by a single-track railway in Piedmont, Italy. Given a baseline scenario, a set of infrastructural and operative improvements are taken into account. The relevant capacity increases are evaluated in terms of reduction of the global travel times of trains with respect to the baseline scenario. Results are analysed and discussed, highlighting the potentialities of the presented method to performing effective capacity evaluations useful for a better exploitation of railway systems.

1. Introduction

1.1. Aims and purposes

In this paper, a capacity analysis is presented, performed on the Canavesana Railway, connecting the towns of Settimo Torinese, Rivarolo and Pont Canavese in Piedmont (Italy). This line consists in a single-track railway owned by Regione Piemonte and managed and operated by the public company GTT (Gruppo Torinese Trasporti), respectively through the two divisions GTT-Infrastruttura (the Infrastructure Manager) and GTT-Trasporto (the Railway Operator). The railway represents a main link - by mean of sub-urban periodic passenger services - between the metropolitan area of Turin with the Canavese area.

The aim of this study is to investigate - both in a qualitative and in a quantitative way - the possible benefits to the passenger service caused by different infrastructural im-

^(*) Politecnico di Torino, DIATI - Sistemi di Trasporto.

^(*) Transport and Mobility Laboratory, Politecnico di Milan.

po suburbano – tra l'area metropolitana di Torino ed il Canavese.

Lo scopo del presente studio è investigare – sia qualitativamente che quantitativamente – i possibili benefici riguardanti il servizio passeggeri causati da alcuni miglioramenti infrastrutturali. A tal scopo è stato impiegato un approccio innovativo al fine di superare le principali limitazioni dei metodi convenzionali di analisi della capacità. Questo approccio si serve di un ambiente di analisi integrato in cui le corse dei treni sono riprodotte tramite la loro micro-simulazione, producendo così i dati di ingresso per uno strumento di generazione di orari fattibili. Quest'ultimi sono poi esaminati tramite opportuni Indicatori Chiave di Prestazione (*Key Performance Index*, KPI) in grado di quantificare varie caratteristiche dell'orario, descrivendo così il modo in cui la capacità è di fatto utilizzata. Tale informazione è in seguito impiegata per valutare i guadagni di capacità derivanti dai miglioramenti, siano essi di tipo infrastrutturale o più semplicemente riguardanti l'esercizio.

Nel presente articolo sono descritti e discussi sia il metodo che l'applicazione al caso di studio. In particolare, nel § 1.2. la Ferrovia Canavesana viene descritta da un punto di vista tecnico e gli scenari infrastrutturali considerati sono concisamente presentati. Il §2. è incentrato sul metodo di valutazione della capacità, descrivendo l'ambiente di analisi per quanto riguarda sia lo strumento di micro-simulazione che quello di generazione automatica di orari fattibili. In particolare, nel §2.1. vengono presentate alcune considerazioni generali e teoriche, mentre nel §2.2. è descritto il pacchetto di calcolo ed analisi SASTRE – impiegato nello studio – rimandando il lettore all'Appendice 1 per la descrizione approfondita del modello di generazione degli orari. Il §3. riguarda l'applicazione del metodo alla Ferrovia Canavesana, con la presentazione e discussione dei relativi risultati. Nel §4. si espongono infine le conclusioni e si propongono i possibili sviluppi dello studio.

La ricerca presentata in questo articolo costituisce l'analisi preliminare di una più ampia attività di ricerca e consulenza effettuata dall'Area Trasporti del Politecnico di Torino – DIATI per il Gruppo Torinese Trasporti (GTT), il quale ha messo a disposizione tutti i dati tecnici e pratici necessari per implementare i modelli e calibrare le simulazioni e l'algoritmo di programmazione.

1.2. La Ferrovia Canavesana

La Ferrovia Canavesana è una linea di 38 km di lunghezza che serve, grazie a 6 stazioni e 6 fermate, la popolosa area del Canavese, situata nella parte settentrionale della provincia di Torino in Piemonte. Questa linea è interconnessa a Settimo con la ferrovia Torino-Milano, appartenente alla Rete Nazionale gestita da Rete Ferroviaria Italiana.

Come illustrato dalla fig. 1, la Ferrovia Canavesana può essere concettualmente suddivisa in due sezioni:

provements. To this purpose, an innovative approach has been applied in order to overpass the limitations of conventional capacity analysis methods. This approach makes use of an integrated analysis environment in which train runs are described through micro-simulation, in order to provide the input data set for a timetabling tool which generates feasible timetables. These are then evaluated with proper Key Performance Indicators (KPIs), which quantify various characteristics of the timetable, thus pointing out the way in which capacity is actually used. This information is therefore utilised to evaluate the capacity gains deriving from infrastructural or operational improvements.

In this paper both the method and the case study application are described and discussed. In particular, in §1.2 the Canavesana Railway is described from a technical viewpoint, concisely presenting the analysed infrastructural scenarios. §2 focuses on the capacity evaluation method, describing the analysis environment for which concerns both the micro-simulation and the timetabling features. In particular, while in §2.1 some general theoretical considerations are presented and discussed, in §2.2 the analysis software package SASTRE is described, referring the reader to Appendix 1 for which regards the extensive description of the timetabling model. In §3 the application of the method to the Canavesana Railway is taken into account, and the relevant results are presented and discussed. Finally, in §4 conclusions are drawn and future developments are proposed.

The study presented in this paper constitutes the preliminary analysis of a wider research and consultancy activity carried out by Politecnico di Torino – DIATI, Transport System for Gruppo Torinese Trasporti (GTT), which provided all the technical and practical information utilised to implement the models and tune the simulation and timetabling algorithms.

1.2. The Canavesana Railway

The Canavesana Railway is a 38-km long line which serves, through 6 stations and 6 stops, the densely populated countryside of the Canavesana area, sited in the northern part of the province of Turin in Piedmont, Italy. This line is interconnected in Settimo with the Turin – Milan railway, belonging to the national Italian network managed by RFI (Rete Ferroviaria Italiana, the Italian Infrastructure Manager).

As displayed by fig. 1, the Canavesana Railway can be conceptually split into two parts:

- the Settimo-Rivarolo section is electrified at 3 kV DC and it is operated with axle-counter automatic block system. The traffic is managed by a Centralised Traffic Controller (CTC). Even if the infrastructure would allow in several stretches a maximum speed equal or higher than 100 km/h, in 2016 a 70 km/h limit was set in order to match the directives of the Italian National Safety Authority for railways (ANSF, Agenzia*

- la sezione Settimo-Rivarolo è elettrificata a 3 kV CC ed impiegata in regime di Blocco Conta Assi. La circolazione è gestita da un Dirigente Centrale Operativo. Anche se l'infrastruttura permetterebbe in numerose tratte una velocità massima pari o superiore a 100 km/h, nel 2016 è stato imposto un limite generale a 70 km/h al fine di rispettare le direttive dell'Agenzia Nazionale per la Sicurezza Ferroviaria (ANSF), prevedenti limitazioni di velocità per tutte le ferrovie ancora prive di un sistema di protezione automatica della marcia dei treni come il SCMT (Sistema Controllo Marcia Treno) adottato dalla Rete Nazionale. Tra Settimo e Rivarolo sono presenti quattro stazioni intermedie in cui possono avvenire gli incroci tra treni marcianti in direzioni opposte. Come anticipato, nella stazione di Settimo la Ferrovia Canavesana è interconnessa con la rete principale attraverso il solo Binario 3. I treni da/per Rivarolo non possono dunque incrociarsi in Settimo. Tuttavia si stanno portando avanti dei lavori al fine di migliorare la topologia dei binari: nel prossimo futuro, questi treni potranno usare i binari 4 e 5, potendo dunque incrociare in tale località;
- la sezione Rivarolo-Pont Canavese, non elettrificata ed impiegata con regime a spola⁽¹⁾. Come illustrato dalla fig. 1, i treni possono entrare nella sezione Rivarolo-Pont Canavese partendo dai binari 1 e 2 della stazione di Rivarolo. Quest'ultima è una stazione di testa, dunque un treno in arrivo da Settimo può continuare in direzione Pont Canavese solo dopo un cambio di direzione a Rivarolo. In questa sezione le stazioni intermedie così come la stazione terminale di Pont Canavese non sono equipaggiate con alcun tipo di segnalamento e i relativi deviatori sono permanentemente bloccati. Come conseguenza non possono essere effettuati incroci e l'intera sezione può essere utilizzata al più da un treno alla volta.

La Ferrovia Canavesana è impiegata da GTT, il quale attua sia come Gestore dell'Infrastruttura che come Operatore Ferroviario. La linea è utilizzata per solo trasporto passeggeri, con l'eccezione di occasionali tratte di carri cisterna da e per un deposito di combustibili. Tali tratte non sono state considerate nella presente analisi, dato che la loro presenza sporadica – normalmente durante le ore notturne – non ha impatto alcuno sul consumo della capacità, non interferendo col servizio passeggeri.

La sezione Settimo-Rivarolo è utilizzata dai convogli afferenti alla Linea 1 del Servizio Ferroviario Metropolitano torinese (SFM), i quali a Settimo impegnano la Rete Nazio-

Nazionale per la Sicurezza Ferroviaria). *It prescribed speed restrictions on all the railways which are still not fitted with an automatic train protection system as the SCMT (Sistema Controllo Marcia Treno) adopted on the national network. Between Settimo and Rivarolo, four intermediate stations are present, where trains crossings can take place. As anticipated, in Settimo station the Canavesana Railway is interconnected with the main network through track 3 only. Trains heading (coming) to (from) Rivarolo therefore cannot cross each other in Settimo. Anyway, works are being carried out in order to improve the track plan: in the future, train will use tracks 4 and 5, so that a crossing could take place;*

- *the Rivarolo-Pont Canavese section, which is not electrified and which is operated with shuttle service⁽¹⁾. As illustrated by fig. 1, trains enter the Rivarolo – Pont Canavese section by departing from tracks 1 and 2 of Rivarolo station. This station is a terminal one, so a train coming from Settimo can continue to Pont Canavese just after a stop and a direction change in Rivarolo. The intermediate stations as well as the Pont Canavese terminus station are not fitted with any signalling device and their switches are permanently blocked. As a consequence, crossings cannot take place in this section which can be utilised by just one train at time.*

The Canavesana Railway is operated by GTT, which acts both as Infrastructure Manager and as Railway Operator. The line is used for passenger services only, with the exception of occasional tank wagons convoys to and from a fuel storage plant. These trains are not taken into account in this analysis, since their sporadic occurrence – normally during night hours - has no impact to the capacity consumption, since they do not interfere with the passenger service.

The Settimo-Rivarolo section is utilised by the trains of Line 1 of SFM (Servizio Ferroviario Metropolitano, the Metropolitan Railway Service of Turin area), which in Settimo enters the national network heading to the Turin railway node. This service is programmed with a periodic timetable, structured on a symmetric grid, featuring two train paths per hour (30 mins period) per direction. The actual train headway is 30 mins during peak hours and 60 mins during off-peak hours. Three types of electric multiple units (EMUs) are utilised, namely the TTR, the ETRY530 and the ETR234.

In the Rivarolo-Pont Canavese section the passenger service is performed with Aln668 diesel railcars with non-periodic timetables. These courses are normally scheduled

⁽¹⁾ In un regime a spola, l'intera linea viene utilizzata da un unico convoglio viaggiante tra le stazioni terminali. Dal momento che questa impostazione del servizio esclude alla radice l'occorrenza di collisioni tra treni, permette di effettuare in sicurezza servizi ferroviari anche in assenza di un sistema di segnalamento funzionante. Nella sezione Rivarolo-Pont Canavese sono comunque utilizzati dei segnali a protezione dei passaggi a livello, al fine di mitigare il rischio di collisioni con mezzi stradali.

⁽¹⁾ With a shuttle service, a whole line can be utilised by one train only, which travels back and forth between the two terminuses. Since this ratio radically excludes the occurrence of trains collision between trains, it permits to safely operate a line even without a signalling system in operation. On the Rivarolo-Pont Canavese sections, signals are utilised to protect level crossings, in order to reduce the risk of collisions with road users.

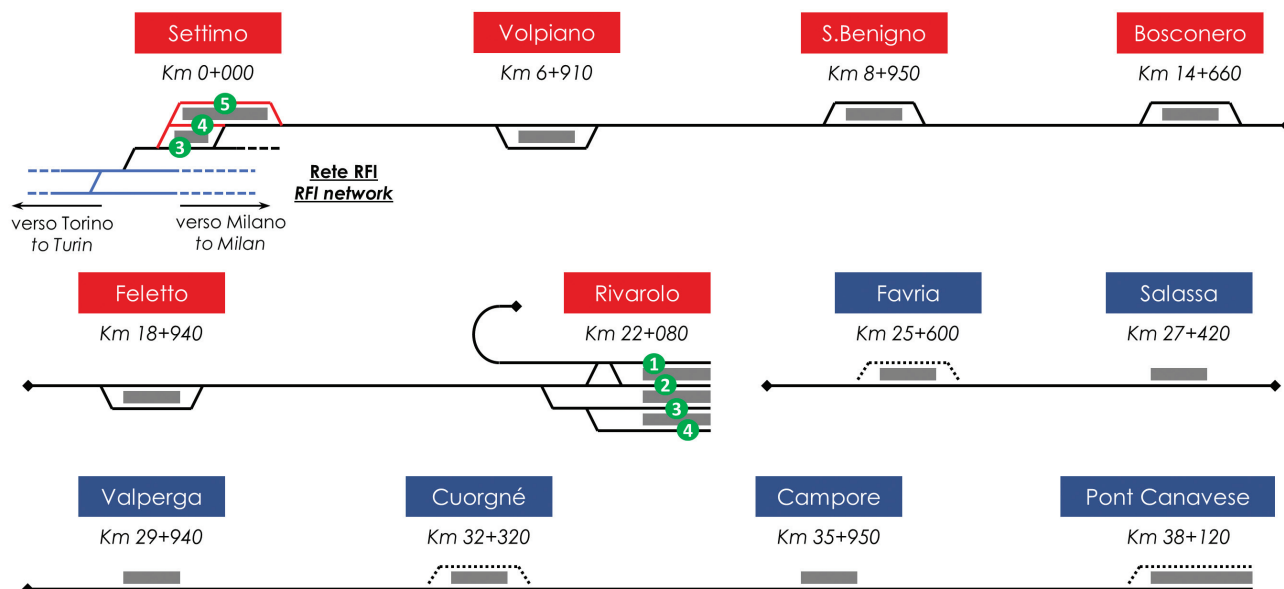


Fig. 1 - Piano schematico della Ferrovia Canavesana. Le etichette blu si riferiscono alla sezione Settimo-Rivarolo, mentre le rosse alla sezione Rivarolo-Pont Canavese. I binari 4 e 5 della stazione di Settimo sono evidenziati in rosso dal momento che non sono ancora stati attivati. Le linee tratteggiate indicano binari esistenti ma al momento preclusi alla circolazione dei treni.

Fig. 1 - Schematic layout of the Canavesana Railway. Blue labels refer to the Settimo-Rivarolo section, while red ones to the Rivarolo-Pont Canavese one. Tracks 4 and 5 in Settimo stations are marked in red since they have not been activated yet. Dashed lines indicate existing tracks which cannot currently be used by trains.

nale per poi entrare nel nodo ferroviario di Torino. Questo servizio è programmato con un orario cadenzato, strutturato su una griglia oraria simmetrica con un periodo di 30 minuti (2 tracce all'ora per direzione di marcia). Il cadenzamento effettivo dei treni è di 30 min durante le ore di punta e di 60 min durante le ore di morbida. Sono impiegati tre tipi di elettromotrici, i TTR, gli ETRY530 e gli ETR234.

Nella sezione Rivarolo-Pont Canavese il servizio passeggeri è disimpegnato da automotrici termiche Aln668, le cui corse sono impostate secondo tramite un orario non cadenzato. Tali corse sono in maggioranza programmate prevedendo una breve coincidenza (circa 10 minuti) con alcuni dei treni SFM1 in arrivo o in partenza a/da Rivarolo.

1.3. Contenuti dell'analisi

Nel contest descritto, questo studio indaga i possibili benefici derivanti dai seguenti interventi infrastrutturali:

- l'attivazione dei binari 4 e 5 nella stazione di Settimo, cosa che implica la possibilità di effettuare incroci in tale località;
- l'attivazione del SCMT tra le stazioni di Settimo e di Rivarolo, con conseguente ristabilimento dei limiti di velocità anteriori alle limitazioni imposte nel 2016;
- l'elettificazione della tratta Rivarolo-Pont Canavese, che permetterebbe di instaurare un servizio passeggeri

with short-time connections (about 10 minutes) with some of the trains departing from and arriving in Rivarolo.

1.3. Contents of the Analysis

Within these framework, the presented analysis investigates the possible benefits of the following infrastructural interventions:

- the activation of tracks n° 4 and 5 in Settimo, which involves the possibility of scheduling train crossings in this station;
- the activation of the SCMT control system between Settimo and Rivarolo, which would permit to restore the pre-2016 speed limits;
- the electrification of the Rivarolo-Pont stretch, which would allow to perform a continuous passenger service covering all the line without any intermediate connection and transfer.

It is worthwhile to remark that the presented analysis is a preliminary one. In facts, some aspects have been neglected, namely:

- no simulations have been performed in order to check out the possible benefits of the infrastructural interventions in case of perturbed traffic;
- the activation of SCMT would significantly modify the speed profile of trains even where the maximum line

ri privo di rottura di carico sull'intera linea senza coincidenze e trasferimenti intermedi.

È opportuno rimarcare che la presente analisi ha caratteri eminentemente preliminari. Infatti sono state introdotte le seguenti semplificazioni:

- non sono state condotte simulazioni che valutino l'influenza degli interventi infrastrutturali sull'esercizio in caso di perturbazioni alla circolazione dei treni;
- l'attivazione del SCMT modificherebbe i profili di marcia dei treni dove la massima velocità di rango non ne verrebbe alterata. Infatti, SCMT impone precise curve di frenatura in corrispondenza delle fermate. Tale comportamento non è stato riprodotto;
- gli orari fattibili sono stati generati e le simulazioni condotte assegnando ai treni dei percorsi fissati a priori (si veda in seguito, in §3.2.2). Ciò potrebbe verosimilmente influire sull'ottimalità dei risultati.

Si è assunto che l'accuratezza risultante da queste assunzioni sia adeguata al carattere preliminare di questa analisi. Esse verranno rimosse e i risultati affinati di conseguenza in studi futuri.

2. Metodo

2.1. L'analisi di capacità di ferrovie a singolo binario

Per valutare gli incrementi di capacità prodotti dagli interventi infrastrutturali prima descritti è stato impiegato un metodo dedicato. Infatti, il particolare caso applicativo rappresentato da una linea a singolo binario percorsa da treni con orario cadenzato richiede un approccio di analisi più raffinato da "classici" metodi sintetici o analitici, basati su formule chiuse. In particolare, i vincoli operativi dati dalla necessità di programmare gli incroci tra treni solo in date stazioni introduce severi vincoli d'orario che possono influire – anche in maniera molto significativa – sull'entità della capacità *de facto* disponibile. Tale fenomeno può minare sensibilmente l'accuratezza dei metodi "classici", come è stato evidenziato e puntualizzato da diversi autori, si vedano per esempio [1] e [2].

Al fine di superare questa impasse ottenendo così risultati più accurati, diversi autori hanno proposto metodi basati sull'orario per valutare la capacità. Questi metodi possono basarsi sia su formulazioni analitiche che su simulazioni che prevedono la generazione e l'analisi automatiche degli orari. Svariati tipi di metodi basati su formule analitiche sono stati sviluppati nel tempo, modellati conformemente alle diverse configurazioni operative delle linee oggetto di analisi⁽²⁾: alcuni esempi al riguardo

speed would not be altered. In fact, it imposes precise braking curves when approaching stops. This behaviour has not been simulated;

- *feasible timetables have been generated and simulations have been run using fixed routing of trains (see later, in §3.2.2). This fact likely affects the optimality of the results.*

It has been assumed that the accuracy resulting from these assumptions is adequate for a preliminary capacity evaluation. These assumptions will be overpassed and results will be refined in further developments.

2. Method

2.1. Performing capacity analysis of single track-railways

In order to evaluate the capacity gains produced by the above described infrastructure improvements, a dedicated method has been used. Indeed, the particular application case given by a single-track railway operated with periodic service calls for an analysis approach different from the "classical" synthetic or analytical ones, based on closed formulations. In particular, the operational constraints given by the need of scheduling train crossings just in given stations introduces strong timetable constraints which could affect - even significantly - the amount of de facto available capacity. This phenomenon significantly affects the accuracy of "classical" methods, as it has been highlighted and investigated by several authors, see for instance [1] and [2].

In order to overcome this impasse, as well as to provide more accurate results, several authors proposed timetable-based capacity evaluation methods. They can rely both on analytical formulations as well as on simulations based on the automatic generation and analysis of timetables. A large number of methods based on analytical formulations has been developed, according to the different operative configurations of the line to be analysed⁽²⁾: examples can be found in the formulation proposed in [3], [4] as well as by the UIC "timetable compression" method [5]. Other studies focused on the balance and the mutual relationships existing between railway capacity utilisation and the relevant punctuality and global quality of the service: for instance, in [6] these indicators are compared to the actual capability of a railway system to satisfy the transport demand of a given area. A comprehensive review of these methods is presented in [7] and [8]. The latter paper proposes a comparison performed between the considered analytical approaches: by applying them to the same case study, the even significant differences existing between their outputs are highlighted and discussed.

⁽²⁾ A causa della loro natura analitica, questi metodi devono essere modellati conformemente a ciascuna realtà operativa studiata, assumendo così diverse formulazioni. Come conseguenza, ciascuna formula deve essere applicata al contesto per il quale è stata concepita: in caso contrario, i risultati prodotti possono essere fuorvianti.

⁽²⁾ Due to their analytical nature, these methods have to be modeled after each operational case, thus assuming various formulation. As a consequence, each formula shall be applied to the proper context; if not, misleading results are prone to be provided.

possono essere rinvenuti in [3], [4] così come nel noto “metodo di compattazione” UIC [5]. Altri studi si sono concentrati sul rapporto e le relazioni reciproche esistenti tra il consumo di capacità e il concomitante andamento della puntualità e della qualità globale dei servizi ferroviari: per esempio, in [6] questi indicatori sono confrontati con l'effettiva capacità di un sistema ferroviario di soddisfare la domanda di trasporto di una certa zona geografica. In [7] e [8] vengono estensivamente presentati e descritti numerosi metodi di questo tipo. In particolare, [8] propone un confronto tra i metodi analitici presi in esame: essi vengono applicati allo stesso caso di studio, evidenziando e discutendo poi le anche significative differenze rilevate nei risultati da essi prodotti.

Anche se i metodi basati su approcci computazionali presentano svariate implementazioni, essi possono essere classificati in due gruppi principali. Da una parte si trovano i metodi caratterizzati da un approccio *what-if*: dato uno scenario di riferimento e modellando via via date modifiche infrastrutturali, si eseguono simulazioni al fine di identificare i possibili benefici alla circolazione ferroviaria. Tale approccio è comunemente utilizzato nel caso in cui lo scopo dello studio sia valutare le migliorie prodotte su di un dato orario – in termini di stabilità e puntualità d'esercizio – da parte di interventi infrastrutturali di tipo locale. In altre parole, questi metodi sono efficaci nel caso in cui non si preveda di alterare radicalmente la struttura dell'orario in conseguenza degli interventi anzidetti. Un esempio di tale tipo di applicazione può essere rinvenuto in [9].

Dall'altro lato, nel caso in cui si debbano studiare interventi infrastrutturali di maggiore entità, non si può prescindere dal prendere in considerazione modifiche anche radicali all'orario d'esercizio. Si può effettuare questo compito tramite un arrangiamento manuale degli orari, ma in generale un approccio di tal fatta – a causa della sua natura manuale e per forza euristica – non può assicurare che i nuovi orari sfruttino appieno la capacità aggiuntiva messa a disposizione dagli interventi infrastrutturali. Al fine di poter effettuare una valutazione più accurata e ripetibile, il processo di generazione degli orari deve essere automatizzato attraverso algoritmi adeguati che assicurino che l'orario risultante sfrutti il più possibile la capacità disponibile. Sono stati proposti svariati metodi che si ripropongono di soddisfare tale necessità, ed essi presentano in generale la stessa impostazione: grazie ad algoritmi dedicati vengono generati degli orari fattibili che utilizzano tutta o una data parte della capacità disponibile. Un orario è detto *fattibile* quando può essere effettivamente rispettato dai treni in esercizio. Per esempio, un orario fattibile deve presentare dei tempi di percorrenza compatibili con le prestazioni del materiale rotabile impiegato e non deve prevedere conflitti di circolazione, vale a dire situazioni in cui due convogli dovrebbero utilizzare la stessa parte di infrastruttura senza rispettare un certo distanziamento temporale minimo. Durante l'esercizio, il verificarsi di tale situazione potenzialmente pericolosa verrebbe scongiurata dal sistema di se-

Methods based on a computational approach feature different implementations, but they can all be classified into two main groups. On one hand methods characterised by a what-if approach can be found: given a baseline scenario, infrastructural improvements are modelled and simulations are run in order to check the possible benefits to the train traffic. This is an approach commonly used in the case that the aim is to evaluate the improvements to a certain timetable – in terms of stability and punctuality – caused by local infrastructural interventions. In other words, these methods are effective when the timetable structure is not susceptible to be radically altered thanks to the abovementioned interventions. An example of such an application can be found in [9].

On the other hand, when major infrastructural interventions are intended to be analysed, even radical modifications of the timetable should be taken into account. This task can be performed through a manual arrangement of the timetables, but in general – due to its manual and heuristic nature – such an approach cannot ensure that the newly-built timetables take full advantage of the infrastructural improvements. In order to carry out a more accurate and repeatable evaluation, the timetable generation process shall be automatised through proper algorithms that ensures that the resulting timetables exploit as much as possible the available capacity. To this purpose, several methods have been proposed, which present all the same structure: thanks to proper algorithms, feasible timetables are generated, which utilise all or a given part of the available capacity. A timetable is said to be feasible when it can actually be respected by trains during operation. For instance, a feasible timetable shall feature running times compatible with the performances of the existing rolling stock and shall not involve traffic conflicts, i.e. situations in which two trains are planned to utilise the same part of infrastructure at the same time or without respecting a certain minimum headway. During operations, this potentially dangerous situation would be avoided by the signalling system, thus preventing the respect of the scheduled timetable.

Feasible timetables are then analysed with proper KPIs, thus pointing out how and how much capacity is utilised. If the feasible timetable is generated in such a way that it utilises as much available capacity as possible in order to maximise (or minimise) a set of these KPIs, these latter would provide a measure of the actual available capacity. Depending on the KPI, this measure can be absolute or relative: in this last case, a comparison with a reference timetable is required. As a consequence, the output of such an approach depends on the KPIs which are included in the target function to be maximised (or minimised) during the generation of the feasible timetables and which are used in the final evaluation. Therefore, the adopted KPIs shall be carefully chosen according to the particular application case.

For instance, in [10], [11], [12], [13] and [14] feasible timetables are generated by using the total travel time of trains as the target KPI to be minimised. In particular, in

gnalamento, impedendo d'altro canto che l'orario programmato venga rispettato.

Gli orari fattibili vengono in seguito analizzati per mezzo di adeguati KPI, definendo così come e quanta capacità sia utilizzata. Se un orario fattibile è generato in maniera tale da utilizzare quanta più capacità possibile al fine di massimizzare (or minimizzare) un certo insieme di questi KPI, quest'ultimi possono costituire una misura della capacità di fatto disponibile. A seconda del KPI, questa misura può essere assoluta o relativa: in quest'ultimo caso si rende indispensabile un confronto con un orario di riferimento. Come conseguenza di ciò, il risultato di tale approccio dipende dai KPI inclusi nella funzione obiettivo da massimizzare (o minimizzare) durante la generazione degli orari fattibili ed in seguito utilizzati nella valutazione finale. Ne risulta che la scelta di tali KPI è un passo preliminare cruciale da effettuarsi conformemente a ciascun caso applicativo.

A titolo di esempio, in [10], [11], [12], [13] e [14] gli orari fattibili sono generate utilizzando come KPI da minimizzare il tempo totale di viaggio dei treni. In particolare, in [10], [11], [12] e [13] questo approccio è impiegato per valutare i benefici del progressivo incremento del numero di binari di una linea ferroviaria. Diversamente, per valutare la capacità in altri studi si è fatto uso di più di un indicatore. Per esempio, in [15] viene posta l'attenzione sulla saturazione robusta degli orari, valutando come la capacità disponibile sia impiegata per migliorare il compromesso tra numero di tracce-treno programmate e stabilità dell'orario risultante. In [16] i KPI adoperati per generare e valutare gli orari fattibili sono il tempo totale di viaggio dei treni, la stabilità degli orari risultanti e il corrispondente numero di coincidenze rispettate che possono di fatto assicurare dati requisiti di qualità del servizio, vale a dire puntualità e tempo di trasferimento.

Nel caso di una linea a singolo binario impiegata con un orario cadenzato, si possono effettuare potenti assunzioni che permettano di restringere la scelta degli indicatori da utilizzare nell'analisi. Le analisi di capacità effettuate su tali sistemi ferroviari – come quelle presentate in [17], [18] e [13] – evidenziano come due KPI possono efficacemente inquadrare il consumo di capacità: il tempo totale di viaggio e la stabilità dell'orario risultante.

L'analisi presentata in [19] si concentra su questi due fattori attraverso una formulazione analitica, evidenziando come il loro andamento definisca di fatto il modo in cui viene impiegata la capacità disponibile. Per prima cosa, viene affermato come il fatto di avere a che fare con orari cadenzati definisce automaticamente il numero di treni circolati per unità di tempo. Quest'ultimo indicatore è pertanto un dato di ingresso della valutazione e non può essere utilizzato per valutare la capacità.

In secondo luogo, il vincolo del cadenzamento congiuntamente al fatto che gli incroci possano essere programmati solo nelle stazioni implica che i tempi di percorrenza dei treni tra ciascuna coppia di fermate consecutive influiscano significativamente su:

[10], [11], [12], and [13] this approach is adopted to evaluate the benefits of the progressive increase of the number of line tracks of a railway. Differently, in other approaches more than one indicator is used to compute the capacity utilisation. For instance, the study reported in [15] focuses on robust timetable saturation, in which it is evaluated how available capacity can be used to improve the trade-off between number of scheduled trains and stability of the resulting timetable. In [16] the KPIs used to generate and evaluate the feasible timetables are the total travel time of trains, the stability of the resulting timetables and the relative amount of passenger connections which can actually ensure given quality requirements, namely punctuality and transfer times.

In case of a single-track line operated with a periodic timetable, it is possible to adopt effective assumptions which allow to restrict the choice of the KPIs to be used in the analysis. Capacity analysis performed on this kind of railway systems - as those presented in [17], [18] and [13] - point out that two KPIs can effectively qualify the capacity consumption: the total travel time of trains and the stability of the resulting timetable.

The analysis presented in [19] focuses on these two factors through an analytical formulation, highlighting how their trend actually defines the way in which available capacity is used. First of all, it is pointed out how the constraint of dealing with a periodic timetable automatically defines the number of trains operated per time unit. This KPI is therefore rather an input of the evaluation process and cannot be used to assess capacity.

As a second instance, the periodicity constraint and the fact that train crossings can be scheduled just in stations imply that the running times of trains between each pair of consecutive stops have a major influence on the:

- 1. feasibility of a timetable featuring the given period;*
- 2. total travel time of the trains, intended as the time interval spanning between the entrance and the leaving of a train in and from the analysed infrastructure;*
- 3. amount of resulting total buffer time, which in turn influences timetable stability.*

In particular, with periodic timetables the above-mentioned buffer time (item 3) is given by the difference between the minimum dwell time in stations – necessary for letting passengers boarding or alighting the trains – and the actual dwell time required by a train crossing scheduled in the same station. This difference represents a buffer time which increases the stability of the timetable, with the assumption that during operations the dwell time not necessary to the passenger service could be reduced in order to recover possible delays. With this premise, the amount of buffer times distributed within a timetable acts as a proxy for the timetable stability.

In case that a feasible timetable could be designed with a given period, possible reductions of the running times

1. fattibilità o meno di un orario avente un dato periodo di cadenzamento;
2. tempo di viaggio totale dei treni, definito come l'intervallo di tempo compreso tra l'entrata e l'uscita di un treno nel e da l'infrastruttura considerata;
3. entità del tempo cuscinetto totale risultante, che a sua volta influisce sulla stabilità dell'orario.

In particolare, nel caso di orari cadenzati tale tempo cuscinetto (punto 3) è dato dalla differenza tra il minimo tempo di sosta nelle stazioni – necessario per la salita e la discesa dei passeggeri – ed il tempo di sosta effettivo causato da eventuali incroci previsti nelle stesse stazioni. Questa differenza dà luogo ad un tempo cuscinetto che va ad incrementare la stabilità dell'orario, sotto l'ipotesi che durante l'esercizio il tempo di sosta non necessario al servizio passeggeri possa essere ridotto al fine di recuperare eventuali ritardi. Con tali premesse, l'entità del tempo cuscinetto distribuito in un orario può essere impiegato come stimatore della stabilità.

Nel caso in cui un orario fattibile possa essere impostato con un dato periodo di cadenzamento, possibili riduzioni dei tempi di percorrenza (per esempio, grazie a miglioramenti di materiale rotabile o infrastruttura) andranno ad influire sui tempi di viaggio totali, sui tempi cuscinetto o su entrambi gli indicatori, in dipendenza dell'entità di tale riduzione e della struttura complessiva dell'orario. È dunque opportuno studiare gli effetti di interventi migliorativi della capacità tenendo presente che essi produrranno soluzioni (vale a dire orari fattibili che massimizzano il consumo di capacità) *dominanti* rispetto alla configurazione iniziale. In altre parole, non è possibile definire a priori che dette soluzioni siano "migliori" di quelle di partenza considerando solamente uno degli indicatori alla volta.

Fig. 2 presenta una rappresentazione grafica di detto fenomeno. In questa immagine gli effetti di un incremento di capacità sono rappresentati sia su un piano cartesiano *tempo di viaggio – stabilità* sia sul grafico radar del "bilancio della capacità" proposto dalla *fiche* UIC 406R [5]. In quest'ultimo caso sono stati inclusi il numero di treni per unità di tempo e il tasso di eterogeneità della circolazione come esempio di due indicatori fissati dal vincolo di cadenzamento.

2.2. Un ambiente integrato per la generazione e l'analisi degli orari

L'approccio di valutazione della capacità basato sull'orario descritto in §2.1 richiede di impostare un adeguato ambiente di analisi in cui sia possibile:

- generare orari fattibili che soddisfino dati vincoli e che sfruttino appieno la capacità disponibile;
- valutare e simulare questi orari al fine di calcolare indicatori adeguati.

Al giorno d'oggi sono disponibili numerosi strumenti di calcolo – alcuni di tipo commerciale e disponibili sul

(for instance, thanks to improvements in rolling stock or infrastructure) will affect the total travel time, the buffer time or both of them, depending on the size of this reduction and on the overall structure of the timetable. Therefore, it is worthwhile to analyse the effects of capacity-improving interventions keeping in mind that they produce solutions (i.e., feasible timetables that maximise the capacity exploitation) which are dominant with respect to the initial configuration. In other words, it is not possible to state a priori that such solutions will be "better" than the starting ones considering just one of the mentioned KPIs at time.

A graphical representation of this phenomenon is provided by fig. 2, where the effects of a capacity increase are displayed both in the travel time – stability plane and in the "capacity balance" radar graph proposed by the UIC leaflet 406R [5]. In the latter, the number of trains per time unit as well as the traffic heterogeneity are included as a sample of two KPIs which are fixed by the periodicity constraint.

2.2. An integrated environment for the timetable generation and analysis

The timetable-based capacity assessment approach described in §2.1 calls for a proper analysis environment in which it shall be possible to:

- Generate feasible timetables which shall furthermore satisfy different constraints and exploit as much as possible the available capacity;
- Evaluate and simulate these timetable in order to compute proper KPIs.

Nowadays, several tools have been developed – some being commercially available, others internally developed and used in universities for research purposes – which are able to perform these tasks to different extents and with different levels of integration. In [20] and [21] extensive reviews of the available tools are presented, and for each of them the main pros and cons are discussed. The original SASTRE tool (Simulazione ed Analisi Sistemi di Trasporto su Rotaie, Simulation and Analysis of Rail Transport Systems) has been developed at Politecnico di Torino, taking advantage from the experience gathered in the last years of applied and theoretical research about railway capacity analysis.

In particular, at Politecnico di Torino different analysis approaches have been experimented. For instance, in [22] capacity is evaluated in terms on number of additional freight trains which it is possible to schedule on a line with a passenger traffic. To do that, train paths are calculated in OpenTrack through micro-simulation and then singularly analysed in MS Excel in order to get the minimum headways. These are then utilised to manually insert additional train paths into the existing timetable, according to an heuristic ratio. Therefore in this case the timetable generation task is not automated, thus limiting the accuracy as well as the repeatability of the whole process.

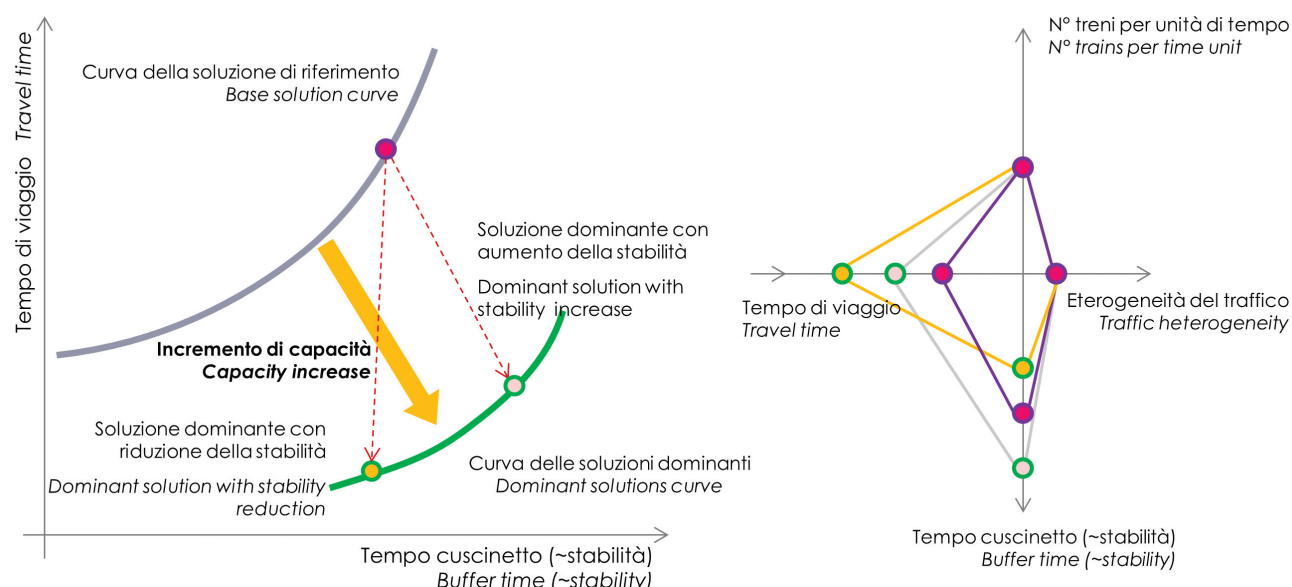


Fig. 2 - Rappresentazione qualitativa di come, nel caso di una linea a singolo binario utilizzata con orario cadenzato, un incremento di capacità possa essere impiegato per ridurre i tempi di viaggio o per incrementare la capacità.

Fig. 2 - Qualitative representation of how a capacity increase on a single track line operated with a periodic timetable can be used to reduce the travel times or to improve stability.

mercato, altri sviluppati ed utilizzati internamente da università ed istituti di ricerca – in grado di effettuare i summenzionati compiti, con diverse potenzialità e diversi gradi di integrazione a seconda dello strumento. In [20] e [21] sono presentate delle approfondite disamine di detti ambienti di calcolo, discutendo per ciascuno di essi i principali pro e contro. Il pacchetto di calcolo SASTRE (Simulazione ed Analisi Sistemi di Trasporto su RotaIE) è stato originalmente sviluppato presso il Politecnico di Torino, DIATI – Sistemi di Trasporto, sulla scorta dell'esperienza maturata negli ultimi anni di ricerca teorica ed applicata sull'analisi della capacità ferroviaria.

In particolare, presso detto Ateneo sono stati sperimentati diversi approcci di analisi. Per esempio, in [22] la capacità viene valutata in termini di numero di tracce merci aggiuntive che è possibile programmare su una linea già gravata da circolazione di treni viaggiatori. A tal scopo, le tracce-treno sono simulate in OpenTrack attraverso la micro-simulazione venendo in seguito analizzate una ad una in MS Excel al fine di calcolare i distanziamenti temporali minimi imposti dal sistema di segnalamento. Questi sono poi utilizzati per inserire manualmente le tracce aggiuntive nell'orario esistente secondo criteri euristici. In questo caso dunque la fase di generazione dell'orario non è stata automatizzata, limitando così la precisione e la ripetibilità dell'intero processo.

Diversamente, in [23] viene presentato uno strumento automatico per la generazione degli orari che fa uso di un algoritmo euristico *greedy* per arrangiare un dato insieme di tracce-treno in orari privi di conflitti. Essi sono poi analizzati con dati indicatori al fine di stimare come

Differently, in [23] an automated tool for timetabling is presented, which uses an heuristic greedy algorithm to arrange a given set of train paths into conflict-free timetables. These are subsequently analysed according to certain KPIs in order figure out how and how much capacity is used. Even if the tool presented in [23] could be seen as an ancestor of SASTRE, it presents the major limitation of being based on a mesoscopic infrastructure model. This fact on one hand does not permit to accurately model all infrastructure topologies, on the other does not allow to run accurate operational simulations by taking properly into account the behaviour of the signalling system.

In [15] OpenTrack is used to arrange the input dataset of a timetabling algorithm – based on the same microscopic model of OpenTrack – which generates conflict-free saturated timetables, in which additional freight train paths are added to a given passenger timetable. The saturated timetable are then simulated in OpenTrack with perturbed traffic conditions in order to evaluate their stability. In this case the microsimulation of timetables and of train paths and the timetable generation are integrated into the same approach. Anyhow, from a practical point of view, difficulties raised with the implementation of a proper interface between the timetabling algorithm and OpenTrack, which, despite its name, is still a commercial software with a rather close and rigid internal structure.

The SASTRE tool has been therefore conceived to intrinsically merge the potentialities of microsimulation software packages (like Open Track or Railsys) with those of timetable-based capacity evaluation environments, thus obtaining an integrated package, easier-to-use and more ac-

e quanta capacità sia consumata. Lo strumento presentato in [23] può essere inteso come un progenitore di SASTRE, sebbene presenti la grossa limitazione di essere basato su un semplicistico modello mesoscopico dell'infrastruttura. Questo fatto da un lato non permette di modellizzare con precisione qualsiasi topologia infrastrutturale, dall'altro impedisce di effettuare simulazioni d'esercizio accurate che riproducano fedelmente il funzionamento del sistema di segnalamento.

In [15] viene utilizzato OpenTrack per preparare i dati d'ingresso di un algoritmo di generazione di orari – basato sullo stesso modello microscopico di OpenTrack – che genera orari saturati privi di conflitti, in cui tracce merci aggiuntive vengono inserite in un dato orario passeggeri. Gli orari saturati sono poi simulati in OpenTrack in condizioni di circolazione perturbata per valutare la rispettiva stabilità. In questo caso la microsimulazione di orari e tracce treno e la generazione degli orari sono concettualmente integrati. Tuttavia, da un punto di vista pratico, sono emerse difficoltà nell'implementare un'interfaccia adatta tra l'algoritmo di generazione degli orari e OpenTrack il quale, al di là del nome, rimane un programma commerciale con una struttura interna piuttosto chiusa e rigida.

Lo strumento SASTRE è stato dunque concepito per mettere intrinsecamente insieme le potenzialità dei programmi di microsimulazione (come OpenTrack o Railsys) con quelle degli ambienti di analisi della capacità basati sull'orario, ottenendo così un pacchetto di calcolo integrato, verosimilmente di più semplice utilizzo e più preciso e flessibile di altri approcci sperimentati. La scelta di costruire da zero un nuovo strumento – in particolare, la parte di microsimulazione – è stata motivata dalla volontà di disporre di una piattaforma (realmente) aperta, adatta ad essere ulteriormente espansa ed integrata con nuove funzioni.

Nei capitoli successivi verrà fornita una concisa presentazione dello strumento. SASTRE è un ambiente di simulazione ed analisi strutturato su due livelli, descritti rispettivamente in §2.2.1 e §2.2.2:

1. nel primo livello viene effettuata la micro-simulazione dei sistemi ferroviari;
2. il secondo livello è dedicato alla generazione automatica di orari fattibili ed alla loro analisi.

In §2.2.3 viene fornita una panoramica generale dello strumento.

2.2.1. Livello 1: la simulazione dei sistemi ferroviari

Il primo livello è dedicato alla simulazione dei sistemi ferroviari; struttura e principi di funzionamento sono analoghi a quelli di pacchetti di simulazione commerciali quali OpenTrack o Railsys. In questa fase un modello microscopico del sistema ferroviario viene definito e dettagliato. Questo modello può essere in linea di principio

curate and flexible than other experimented approaches. The choice to build from scratch a new tool – in particular, the microsimulation part – has been motivated by the need to have a (really) open-platform available, suitable to be further expanded and integrated with new functions.

A concise introduction of the tool is provided in the following sections. SASTRE is a simulation and analysis environment consisting of two layers, described in §2.2.1 and §2.2.2 respectively:

1. *the first layer performs the microscopic simulation of railway systems;*
2. *the second layer performs the automatic generation of feasible timetables as well as their analysis.*

In §2.2.3 a global overview of the tool is provided.

2.2.1. Layer 1: the simulation of railway systems

The first layer is dedicated to the simulation of railway systems, and its structure and working principles are similar to those of commercial simulation software, as Open Track or Railsys. Here a microscopic model of the railway system is defined and edited. The model can be conceptually split into three main structures, whose contents are summed up by table 1.

A mixed discrete-continuous event-driven simulation algorithm runs with these data in order to simulate the courses according to the provided timetable. The continuous part of the algorithm simulates the runs of the courses through the numerical integration of the motion equation, while the discrete part simulates the behaviour of the signalling system, whose state is affected by the position of the trains within the network. The state of the signalling system can in turn modify – through not-permissible aspects of the signals – the running profile of the courses.

This simulation layer can therefore be used to simulate a given timetable, in order to check if it is feasible and, if not, to assess the perturbation caused by the conflicts of the trains. It can also be used to evaluate the effects of traffic perturbations – introduced by primary delays affecting the trains runs – on a feasible timetable previously designed. Finally, this first layer is designed to arrange the input data set used by the second layer for the automatic generation of feasible timetables, as explained in §2.2.2.

2.2.2. Layer 2: the timetabling model

The problem of generating railway timetables which fulfil given feasibility and quality constraints is a “classical” one in the field of Operational Research. It has been addressed by several researchers, and different approaches have been proposed to solve it. Extensive literature reviews about the state-of-art of the research in this field can be found in [24], [25] and [26].

suddiviso in tre strutture principali, i cui contenuti sono descritti dalla tabella 1.

Un algoritmo di simulazione ad eventi discreti di tipo misto discrete-continuo utilizza questi dati per simulare la circolazione secondo l'orario fornito. La parte continua dell'algoritmo simula la marcia dei treni attraverso l'integrazione numerica dell'equazione fondamentale del moto, mentre la parte discreta simula il funzionamento del sistema di segnalamento, il cui stato è determinato dalla posizione dei treni all'interno della rete. Lo stato del sistema di segnalamento può a sua volta modificare – tramite aspetti non permissivi dei segnali – il profilo di marcia delle corse.

Questo livello dedicato alla simulazione può quindi essere impiegato per simulare un certo orario, al fine di verificare se esso sia fattibile o meno. In caso negativo, si possono valutare le perturbazioni date dai conflitti tra convogli. Può anche essere utilizzato per esaminare gli effetti di perturbazioni d'esercizio – introdotte tramite ritardi primari gravanti sulle corse – su un orario fattibile preparato in precedenza. Infine, questo livello è progettato per preparare l'insieme di dati di ingresso usato dal se-

In the SASTRE tool a Mixed Integer Linear Programming model for timetabling is implemented, which - according to the cited sources - belongs to the Train Timetabling Problems (TTP) class. In a TTP, an input timetable - not necessarily feasible - is provided, and the aim of the problem is to arrange the entry times, the run times and the dwell times of the scheduled trains in order to ensure the timetable feasibility and the respect of possible additional constraints.

The MILP model utilised in this study to generate feasible periodic timetables, has been modelled after that proposed in [27], [28], [29], in which it is used to implement a real-time traffic management algorithm as well as a timetable saturation method. This model significantly differs from the microscopic one utilised in layer 1. In particular, if in the microscopic model the fundamental element was the Topological Part, here this role is performed by the Track Detection Section (TDS).

According to the blocking time theory [30], TDSs can be utilised by just one train at time. The utilisation of a TDS starts when the signalling system reserves it for a certain train and ends when the tail of this train leaves

TABELLA 1 – TABLE 1

Informazioni incluse nel modello microscopico dei sistemi ferroviari usato nel livello 1 di SASTRE
Information included in the microscopic model of railway systems used in layer 1 of SASTRE

Struttura Structure	Dati Data
INFRASTRUTTURA INFRASTRUCTURE	<ul style="list-style-type: none"> Topologia infrastrutturale, definite come un grafico diretto i cui archi – le Parti Topologiche – sono qualificate da caratteristiche come lunghezza, velocità massime, livelletta e raggio di curvatura; <i>Infrastructure topology, defined as a directed graph whose edges – the Topological Parts – are qualified by characteristics as the length, the maximum speeds, the grade and the curve radius;</i> Posizione e caratteristiche (numero di aspetti, possibili restrizioni di velocità) dei segnali; <i>Position and features (as number of aspect or possible route speeds) of signals;</i> Posizione e caratteristiche (come il “telegramma” trasmesso) delle boe di linea utilizzate dai sistemi di controllo avanzati come ETCS/ERTMS livello 1 e 2, nel caso di linee ad alta velocità, o SCMT, utilizzato normalmente per linee tradizionali; <i>Position and features (as the transmitted message) of the trackside balises used by advanced control systems as ETCS/ERTMS level 1 and 2, namely for High Speed Lines, or SCMT, usually for the traditional ones;</i> Posizione dei punti orario (per esempio, i punti in cui le fermate d'orario vengono programmate); <i>Position of the timing points (for instance, the place in which timetable stops can be scheduled);</i> Posizione dei giunti isolati che definiscono i circuiti di binario utilizzati dal sistema di segnalamento per verificare l'occupazione delle sezioni di blocco, cosa che a sua volta influenza l'aspetto dei segnali; <i>Position of the isolated joints that define the Track Detection Sections (TDSs) used by the signalling system to check the occupation of the block sections, which affect the signals aspect in turn;</i> Percorsi (intesi come sequenze di Parti Topologiche) utilizzati dalle corse. <i>Itineraries (intended as sequences of Topological Parts) that can be used by the courses.</i>
DEPOSITO DEPOT	<ul style="list-style-type: none"> Tipi e caratteristiche del materiale rotabile, come massa, lunghezza, velocità massima, caratteristiche di trazione e frenatura, resistenza al moto e altre. <i>Rolling stock type and characteristics, as mass, length, maximum speed, traction and braking performances, motion resistances and others.</i>
ESERCIZIO OPERATION	<ul style="list-style-type: none"> Corse, definite come un tipo di materiale rotabile associate ad un percorso; <i>Courses, defined as a rolling stock type associated to an itinerary;</i> Orario per ciascuna corsa il quale definisce – per ciascun punto orario utilizzato nel percorso prescelto – i tempi di arrivo e partenza programmati, così come i minimi tempi di sosta da rispettare; <i>Timetable for each course, which defines - for each utilised timing point in the relevant itinerary the scheduled arrival and departure times, as well as the minimum dwell time to be ensured;</i> Possibili vincoli aggiuntivi riguardanti il sistema di segnalamento (per esempio, dipendenze reciproche tra itinerari di stazione) o il sistema di gestione della circolazione (per esempio, criteri per la gestione operativa in caso di perturbazioni dell'esercizio). <i>Possible additional constraints regarding the signalling system (e.g., mutual dependencies between station routes) or the traffic management during operations (e.g., ratios for active train dispatching in case of perturbations).</i>

condo livello per effettuare la generazione automatica degli orari fattibili, come spiegato in §2.2.2.

2.2.2. Livello 2: il modello di generazione degli orari

La generazione di orari ferroviaria che soddisfino dati requisiti di fattibilità e in generale di qualità è un problema “classico” nel campo della Ricerca Operativa. Esso è stato affrontato da numerosi ricercatori, i quali nel tempo hanno sviluppato diversi approcci per la sua risoluzione. In [24], [25] e [26] si possono trovare alcune approfondite disamine bibliografiche a proposito dello stato dell'arte di tale argomento.

Nello strumento SASTRE è implementato un modello di Programmazione Lineare Misto-Intera (MILP, *Mixed Integer Linear Programming*) per la generazione degli orari. Volendo seguire le classificazioni proposte dalle fonti citate, un modello di tal fatta appartiene alla classe detta dei *Train Timetabling Problem* (TTP). In un TTP viene fornito un orario di partenza – non necessariamente fattibile – e l'obiettivo del problema è modificare i tempi di ingresso, di sosta e di percorrenza per ciascuna traccia programmata al fine di assicurare la fattibilità dell'orario oltre a rispettare possibili vincoli aggiuntivi.

Il modello MILP usato in questo studio è stato progettato seguendo un'architettura simile a quelli proposti in [27], [28] e [29], in cui modelli analoghi sono utilizzati al fine di implementare un algoritmo di gestione della circolazione in tempo reale e un metodo di saturazione degli orari. Il modello in questione è significativamente diverso da quello microscopico utilizzato dal livello 1. In particolare, se nel modello microscopico l'elemento fondamentale era la Parte Topologica, ora questo ruolo è ricoperto dai Circuiti di Binario (CB).

Seguendo il principio del blocco fisso [30], i circuiti di binario possono essere utilizzati da un solo treno alla volta. L'utilizzo di un CB inizia nell'istante in cui il sistema di segnalamento lo riserva per un certo treno e finisce quando la coda del treno in questione abbandona il CB ed il sistema di segnalamento lo riconosce come libero. A questo punto il CB può essere riservato (e dunque utilizzato) da altri treni. Un orario è fattibile – privo di conflitti di circolazione – quando in nessun CB sono presenti accavallamenti tra i periodi di utilizzo dei treni che lo percorrono.

Oltre alla fattibilità, nel modello di generazione degli orari sono implementati altri vincoli, di seguito elencati:

- l'imposizione di dati tempi di arrivo o di partenza di un dato treno in una data stazione;
- l'imposizione di un dato distanziamento temporale tra due arrivi consecutivi in una data stazione;
- premesso che in questo studio si considera un'unica linea in cui possono essere definite due direzioni, l'imposizione che il tempo di sosta complessivo associato ai treni marcianti in una direzione sia non maggiore di quello relativo alla direzione opposta.

the TDS and the signalling system releases it. At this point the TDS can be reserved (utilised) by other trains. A timetable is feasible - or conflict-free - when, for each TDS, no overlap of the utilisation intervals of the trains utilising it is present.

In addition to feasibility, three other constraints are implemented into the timetabling model, namely:

- *the imposition of a given arrival or departure times of a given train in a given station;*
- *the imposition of a given headway between two consecutive trains arrivals in the same station;*
- *provided that in this study we consider a single line in which we can define two running direction, the imposition that the overall dwell time scheduled for the trains running in one direction is not greater than that relevant to the other direction.*

The reader is referred to Appendix 1 for a complete analytical description of the timetabling model.

2.2.3. The complete tool

Proper interfaces are designed in order to transfer data from one layer to the other, through guided and highly automated procedures. In this way, the functions provided by the two layers would provide a powerful tool to be used for timetable-based capacity analysis, as illustrated in fig. 3. To this purpose, layer 1 is firstly used to arrange the input data set for the second layer. In principle, this data set contains for each course the information about its running times and the minimum headways imposed by the signalling system. On this basis, in layer 2 feasible timetables are generated and analysed according to different KPIs, as anticipated in §2.1. If needed, these timetables can then be re-converted into the microscopic model of layer 1 and operational simulations can be run with perturbed traffic in order to evaluate their stability.

The tool is implemented through a set of Python 3.5 libraries, containing the data structures as well as the relevant methods as the discrete-continuous event simulation algorithm or the conversion interfaces. Libraries are intended to be utilised in scripts, even if a graphical interface is provided as well, which permits to edit and explore the infrastructure microscopic model. The data subset described by table 1 can be saved and exported in XML format.

3. Application

3.1. KPIs for timetable evaluation

Whatever passenger service nowadays performed on the Settimo-Rivarolo section shall respect the periodicity which characterises all the sub-urban services of the Turin node. For this reason, this analysis has been carried out taking into account just periodic timetables.

Si rimanda il lettore all'Appendice 1 per una descrizione analitica completa del modello di generazione degli orari.

2.2.3. Lo strumento nel suo insieme

Per trasferire i dati da un livello all'altro sono state progettate interfacce adeguate, utilizzabili tramite procedure guidate ed altamente automatizzate. In questo modo, le funzioni provviste dai due livelli costituiscono un potente strumento per effettuare analisi di capacità basate sugli orari, come illustrato dalla fig. 3. A tal fine, il livello 1 è inizialmente impiegato per preparare i dati di ingresso per il secondo livello, dati che contengono essenzialmente le informazioni riguardanti i tempi di percorrenza di ciascuna corsa ed i minimi distanziamenti temporali imposti dal sistema di segnalamento. Con tali informazioni il livello 2 genera e analizza gli orari fattibili secondo KPI diversi, come anticipato nel §2.1. Se necessario, quest'ultimi orari possono essere riconvertiti nel modello microscopico del livello 1 e venir simulati in condizioni di perturbazione dell'esercizio, al fine di valutare la loro stabilità.

Lo strumento è implementato tramite un insieme di librerie - scritte nel linguaggio Python 3.5 - contenenti le strutture dei dati, i relativi metodi, l'algoritmo di simulazione ad eventi discreti e le interfacce di conversione. Sebbene queste librerie siano concepite per essere utilizzate tramite *script*, è stata sviluppata anche un'interfaccia grafica che permette di esplorare e modificare il modello microscopico dell'infrastruttura. La struttura dati descritta in tabella 1 può essere salvata ed esportata in formato XML.

This assumption permits to restrain the analysis of a whole timetable to that of a base grid pattern, obtained through the repetition, for each line and each running direction, of equal train paths modelled after proper base path types. This base grid pattern contains all the available paths, which can then be utilised or not during real operations. For instance, during off-peak hours the service frequency could be reduced by "skipping" some paths, without altering the grid structure.

With these premises, and keeping in mind the theoretical considerations presented in §2.1, the capacity assessment of a single-track timetable operated with periodic timetables can be performed through the analysis of the base paths which compose the base grid pattern. In this study, they are examined through the KPIs reported by table 2, which are influenced by the station dwell time scheduled by the MILP algorithm in order to make the timetables feasible.

Timetable stability can be evaluated through ex-ante and ex-post indicators. Ex-ante indicators are computed on nominal timetables, and are independent from the primary delays that can affect the trains during operation. Ex-post KPIs are evaluated on "actual" timetables (i.e., the ones featuring the paths actually followed by trains during operation), provided by railway operators or by simulations. For an extensive description of these indicators, the reader is referred to [31], [32] and [33]. In this study, the stability of the whole timetable is estimated through the ex-ante indicator "total stability margin" (TSM), referred to a single path.

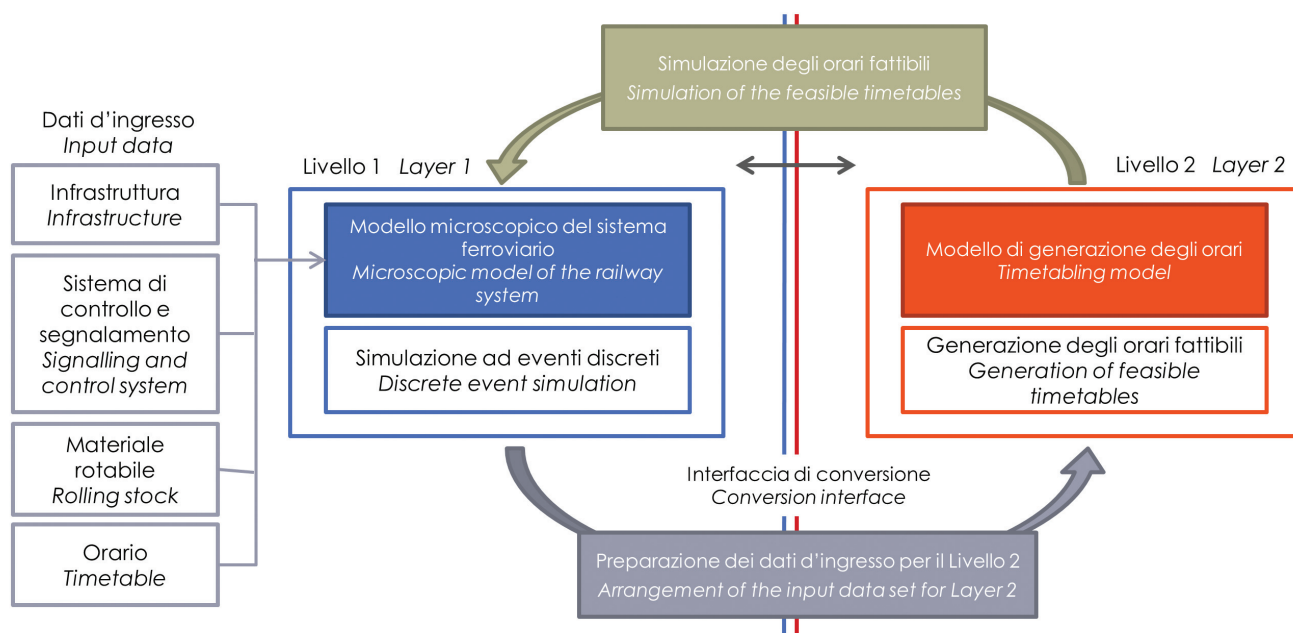


Fig. 3 - La struttura a due livelli dello strumento SASTRE.
Fig. 3 - The two-layers structure of the capacity analysis tool SASTRE.

3. Applicazione

3.1. Indicatori per la valutazione dell'orario

Qualsiasi servizio passeggeri oggi effettuato sulla tratta Settimo-Rivarolo deve rispettare il cadenzamento caratterizzante tutti i servizi urbani e sub-urbani gravitanti sul nodo di Torino. Per questa ragione, questa analisi è stata condotta considerando solo orari cadenzati.

Questa assunzione permette di restringere l'analisi allo studio di una *griglia di base* ottenuta dalla ripetizione periodica, per ciascuna linea e ciascuna direzione di marcia, di tracce-treno tutte uguali a date *tracce-treno di base*. Questa griglia di base conterrà dunque tutte le tracce disponibili, che potranno poi essere utilizzate o meno durante l'esercizio reale. Per esempio, durante le ore di morbida la frequenza del servizio può essere ridotta "saltando" alcune tracce senza d'altra parte alterare la struttura della griglia.

Con tali premesse e tenendo presenti le considerazioni teoriche presentate nel §2.1, l'analisi di capacità di una linea a binario singolo impiegata tramite orari cadenzati può essere effettuata analizzando le tracce-treno di base che costituiscono la griglia di base. In questo studio, esse sono esaminate tramite gli indicatori riportati nella tabella 2, i quali sono a loro volta influenzati dai tempi di sosta in stazione programmati dall'algoritmo MILP al fine di rendere fattibili gli orari.

La stabilità dell'orario può essere valutata tramite indicatori *ex-ante* ed *ex-post*. I primi sono calcolati sugli orari nominali, e sono indipendenti dai ritardi primari che possono riguardare i treni durante l'esercizio. Gli indicatori *ex-post* sono valutati sugli orari circolati (cioè, gli orari descrittivi le tracce effettivamente seguite dai treni durante l'esercizio) forniti dagli operatori ferroviari o ottenuti tramite simulazioni. Si rimanda alle fonti [31], [32] e [33] per delle descrizioni estese di questi indicatori.

The TSM of a single path (i.e., of a course c using a trip t , according to the notation introduced in Appendix 1) is a percentage calculated as follows

$$TSM_c = \frac{TTT - \sum_{j \in t} dw_{MINj}}{TTT} \cdot 100 \quad (1)$$

This KPI actually provides a relative estimation of the dwell time not necessary for passenger service, comparing it to the total travel duration. This extra dwell time acts as an "ex-ante" indicator for stability, since it can be used by trains to recover delays during operations.

3.2. Scenarios description

The study is carried out through the analysis of a set of scenarios. These are obtained as the combination of infrastructural and operative scenarios. The first ones model the infrastructural improvements described in §1.2, while the second ones investigate different timetables which are feasible on the same infrastructure, thus leading to different ways to exploit the available capacity.

The overall set of scenarios is obtained through a full-factorial plan, i.e. all the possible combinations between infrastructural and operative scenarios have been analysed.

3.2.1. Infrastructural scenarios

As anticipated in §1.2, the aim of this study is to assess the influence of different infrastructural improvements, with respect to the present-day situation. In order to do that, the following infrastructural scenarios have been taken into account:

0. Actual configuration (baseline scenario);
1. Activation of tracks 4 and 5 in Settimo stations;
2. Increase of the maximum line speeds between Settimo and Rivarolo;

TABELLA 2 – TABLE 2

Indicatori utilizzati per valutare gli orari fattibili
KPIs used to evaluate the feasible timetables

Indicatore - KPI	Descrizione - Description
TRT tempo di percorrenza totale total run time	Tempo totale impiegato dalle tracce di base per percorrere le tratte comprese tra ciascuna coppia di fermate consecutive Total time spent by the base paths for covering the line stretches between each pair of consecutive stops
TDT tempo di sosta totale total dwell time	Tempo totale passato dalle tracce base sostando in stazione. Questo è di fatto il valore minimizzato dalla funzione obiettivo dell'algoritmo MILP di generazione degli orari Total time spent by the base paths dwelling idle in stations. This is actually the value minimised in the objective function of the MILP timetabling algorithm
TTT tempo di viaggio totale total travel time	Intervallo temporale compreso tra l'arrivo nella prima stazione utilizzata e la partenza dall'ultima stazione utilizzata Time span between the arrival in the first utilised station and the departure from the last utilised station
TSM margine di stabilità totale total stability margin	Indicatore ex-ante di stabilità della singola traccia Ex-ante indicator of the stability of a single path

In questo studio, la stabilità dell'intero orario è stimata attraverso l'indicatore ex-ante "margine di stabilità totale" (TSM) riferito ad una singola traccia.

Il TSM di una singola traccia (cioè una corsa c che utilizza un trip t , seguendo la notazione introdotta in Appendice 1) è una percentuale calcolata come segue

$$TSM_c = \frac{TTT - \sum_{j \in t} dw_{MINj}}{TTT} \cdot 100 \quad (1)$$

Questo indicatore di fatto fornisce una stima relativa del tempo di sosta non necessario per il servizio passeggeri confrontato con la durata complessiva del viaggio. Questo tempo di sosta aggiuntivo agisce come un indicatore ex-ante per la stabilità, dal momento che può essere utilizzato dai treni per recuperare possibili ritardi accumulati durante l'esercizio.

3.2. Descrizione degli scenari

Lo studio è effettuato tramite l'analisi di un insieme di scenari. Essi sono definiti dalla combinazione di *scenari infrastrutturali ed operativi*. I primi modellano gli interventi infrastrutturali descritti nel §1.2, mentre i secondi indagano diversi orari, fattibili sulla stessa infrastruttura, che comportano modi diversi di impiegare la capacità disponibile.

L'insieme di scenari complessivo è ottenuto attraverso un piano fattoriale completo, vale a dire che sono state analizzate tutte le possibili combinazioni di scenari infrastrutturali ed operative.

3.2.1. Scenari infrastrutturali

Come anticipato nel §1.2, lo scopo del presente studio è valutare l'influenza di diversi interventi infrastrutturali in comparazione con la situazione attuale. A tal fine sono stati considerati i seguenti scenari infrastrutturali:

0. Configurazione attuale (scenario di riferimento);
1. Attivazione dei binari 4 e 5 nella stazione di Settimo;
2. Combinazione degli scenari 1 e 2;
3. Elettificazione della sezione Rivarolo-Pont Canavese e miglioramento delle stazioni di Favria, Cuorgné e Pont Canavese.

Negli scenari da 0 a 3 la sezione Rivarolo-Pont si intende impiegata con un servizio a spola indipendente dall'orario cadenzato impiegato nel resto della linea. Infatti, in tali scenari, i treni appartenenti alle due sezioni della linea non condividono nessuna porzione di tracciato. Pertanto in questi scenari l'analisi considera la sola sezione Settimo – Rivarolo.

Nello scenario 4 si indaga la possibilità di effettuare servizi passeggeri senza rottura di carico (tramite la coincidenza intermedia a Rivarolo) tra Rivarolo e Pont Canavese.

3. *Combinazione di scenari 1 and 2;*

4. *Electrification of the Rivarolo- – Pont Canavese section and improvement of the stations of Favria, Cuorgné and Pont Canavese.*

In scenarios 0 to 3 the Rivarolo-Pont section is intended to be operated with a shuttle service independent from the periodic timetable utilised in the rest of the line. In fact, in these scenarios, trains belonging to the two lines do not share any track section. Therefore, in these scenarios the analysis is performed considering the Settimo-Rivarolo section only.

In scenario 4, the possibility of setting up a continuous passenger services (without the intermediate connection and transfer in Rivarolo) between Settimo and Pont is investigated. In particular, it is assessed if such a service could be performed without any crossing in the Rivarolo-Pont section, or – if not – which stations should be equipped with adequate sidings and signalling. In this scenario, the whole infrastructure is therefore taken into consideration. The track layout of the Rivarolo station (see fig. 1) implies that trains coming from Settimo and heading to Pont (and vice-versa) have to change running direction. In the timetabling model, this is obtained by defining two different lines (one for the Settimo-Rivarolo and one for the Rivarolo-Pont sections respectively) linked by a connection in Rivarolo. The connection is expressed by a set of constraints of the type formalised in Appendix 1 by eq. 20.

3.2.2. Operative scenarios

General constraints

As explained in §3.1, this analysis is carried out focusing on the base paths which define the base grid pattern of the periodic timetables. According to the frequency of the service nowadays performed on the Settimo-Rivarolo section, the feasible timetables analysed in this study are generated with a 30 minutes period.

As far the running directions of trains are concerned, the following definitions are given:

- *Even direction: Pont Canavese → Rivarolo → Settimo;*
- *Odd direction: Settimo → Rivarolo → Pont Canavese.*

With respect to the Settimo-Rivarolo section, to choose the two trips paths to be used in the base grid requires to make assumptions regarding:

- *the rolling stock: three different EMUs are actually employed in the line;*
- *the trips itineraries: in real operations, in stations trains would always use the direct track as long as a crossing is not scheduled. In this case, normally the first train which arrives at the station will use the deviated track.*

A preliminary calculation permitted to point out that the running performances of the three considered rolling

vese. In particolare, viene valutato se tale servizio possa essere effettuato senza richiedere di programmare incroci tra Pont e Rivarolo, ed in caso contrario quali stazioni debbano essere attrezzate con binari di incrocio, segnalamento ed apparati. In questo scenario viene presa in considerazione l'intera infrastruttura. La topologia della stazione di Rivarolo (si veda fig. 1) implica che i treni in arrivo da Settimo e precedenti verso Pont (e vice versa) debbano invertire la direzione di marcia. Nel modello di generazione degli orari, questo è ottenuto definendo due diverse linee (una per la sezione Settimo – Rivarolo, l'altra per la sezione Rivarolo – Pont) collegate da una coincidenza nella stazione di Rivarolo. La coincidenza è espressa da un insieme di vincoli formulati come da eq. 20 di Appendice 1.

3.2.2. Scenari operativi

Vincoli generali

Come esplicitato nel §3.1, questa analisi è effettuata studiando le tracce base che costituiscono la griglia base dell'orario cadenzato. Considerata la frequenza del servizio ad oggi offerto sulla sezione Settimo-Rivarolo, tutti gli orari fattibili analizzati in questo studio sono generati con un periodo di 30 minuti.

Per quanto riguarda le direzioni di Marcia dei treni, si danno le seguenti definizioni:

- Direzione Pari: Pont Canavese → Rivarolo → Settimo;
- Direzione Dispari: Settimo → Rivarolo → Pont Canavese.

In riferimento alla sezione Settimo-Rivarolo, per scegliere le tracce base da utilizzarsi nella griglia base bisogna effettuare delle assunzioni al riguardo di:

- materiale rotabile: tre diversi tipi di elettromotrici sono ad oggi impiegate sulla linea;
- percorsi seguiti dalle tracce: nell'esercizio reale, nelle stazioni i treni utilizzano sempre il binario di corretto tracciato fintantoché non è previsto un incrocio. In tal caso, normalmente il primo treno ad arrivare va ad impiegare il binario di deviata.

Un calcolo preliminare ha permesso di evidenziare come le prestazioni di marcia dei tre tipi di materiale rotabile considerato (TTR, ETRY530 e ETR234) siano molto simili tra di loro. Il resto dell'analisi è stato dunque effettuato prendendo il TTR come materiale rotabile di riferimento.

Per quanto riguarda i percorsi è stata fatta un'assunzione importante, dal momento che il modello di generazione degli orari descritto nel §2.2.2 ed in Appendice 1 non effettua l'assegnazione dei percorsi. Come conseguenza, gli itinerari di stazione devono essere assegnati a priori al fine di rendere possibile gli incroci in ciascuna stazione della linea, come descritto dalla tabella 3. Ciò implica che negli orari fattibili risultanti alcuni treni utilizzeranno gli itinerari di deviata anche se non richiesto

stock types (TTR, ETRY530 and ETR234) are very similar. The following analysis has been carried out using the TTR as a reference rolling stock.

As far as the itineraries are concerned, an assumption has been made, since the timetabling model described in §2.2.2 and in Appendix 1 does not perform routing. As a consequence, the station tracks have to be chosen a priori in order to let crossings be possible in all the stations of the line, according to table 3. This would entail that in the resulting feasible timetables, trains use deviated tracks even if it is not required by a crossing. Even if to use a deviated track affects the running time – due to the speed reduction at 30km/h in the station sidings – this assumption has been retained to be acceptable for the preliminary character of this study.

Stops are set in all stations. The minimum dwell time is set equal to 1 min in the Settimo-Rivarolo section and to 30 s in the Rivarolo-Pont one (according to the current passenger timetable). The maximum dwell time is set equal to 7 min. This value has been chosen as it is the minimum one which produces feasible timetables in all the scenarios analysed in this study.

In infrastructural scenario 4, the connection constraint imposed in Rivarolo through eq. 20 is imposed with the following values of δ_1 and δ_2 , minimum and maximum connection times respectively (see Appendix 1):

- $\delta_1=10$ min, in order to model the operations necessary for changing the run direction of trains;
- $\delta_2=17$ min, in order to set the maximum dwell time of 7 min used for the other stops of the line.

Additional constraints

The operative scenarios are defined by the activation (or not) of the following constraints:

CA constraint (Contemporaneous Arrival): prohibition of the contemporaneous arrivals of two trains – coming from opposite directions – in the same station. According to eq.17 and eq.18 in Appendix 1, it is imposed that two consecutive arrivals are separated by at least 2 min. This constraint is due to the signalling and control system as well as by the station track topology, and its removal is not foreseen by the activation of SCMT. Nevertheless, its influence has been evaluated in this study, in order to check whether it could be an effective solution to be pursued with future improvements or not.

NE constraint (Node Entry): even if in this study just the section Settimo-Rivarolo has been analysed, the courses belong to the SFM 1 suburban line which enters the Turin node. As a consequence, timetables designed for the Canavesana Railway shall be compatible – and subordinated – with that programmed for the main Turin-Milan line. This fact is of central importance because of the significant exploitation level of the Turin-Milan railway, that requires that trains leaving Settimo toward Turin shall depart with-

da un incrocio. Anche se tale fatto influisce sui tempi di percorrenza – a causa della riduzione di velocità a 30 km/h sul ramo di deviazione dei deviatori – si è ritenuto che questa assunzione sia accettabile dato il carattere preliminare di questo studio.

In ciascuna stazione viene programmata una fermata. Il minimo tempo di sosta è posto pari a 1 minuto nelle sezioni Settimo-Rivarolo e 30 s nella sezione Rivarolo – Pont (in analogia all’orario passeggeri attuale). Il massimo tempo di sosta è posto pari a 7 min. Questo valore è stato scelto in quanto è quello minimo che permette di ottenere orari fattibili in tutti gli scenari analizzati.

Nello scenario infrastrutturale 4, il vincolo di coincidenza imposto a Rivarolo dall’eq.20 è imposto con in sequenti valori di δ_1 e δ_2 , rispettivamente il minimo e massimo tempo di coincidenza (si veda Appendice 1):

- $\delta_1=10\text{ min}$, per modellizzare il tempo di giro-banco;
- $\delta_2=17\text{ min}$, per imporre il massimo tempo di sosta di 7 minuti adottato per le altre fermate della linea.

Vincoli aggiuntivi

Gli scenari operative sono definiti dall’attivazione (o disattivazione) dei seguenti vincoli:

Vincolo CA (Arrivo Contemporanea): inibizione dell’arrivo contemporaneo di due treni – provenienti da direzioni diverse – nella stessa stazione. Tramite le eq.17 ed eq.18 descritte in Appendice 1, viene imposto che due arrivi consecutivi siano separati da almeno 2 minuti. Nella realtà, questo vincolo si deve al sistema di segnalamento e controllo ed alla topologia dei binari di stazione e l’attivazione di SCMT non permette la sua rimozione. Ciononostante in questo studio si è provveduto a valutare l’influenza di tale vincolo, al fine di valutare se la sua rimozione possa essere un obiettivo interessante da ricercare in futuro.

Vincolo NE (Entrata Nodo): in questo studio viene studiata la sola sezione Settimo-Rivarolo, tuttavia le corse interessate afferiscono alla linea SFM 1 che interessa il nodo di Torino. Di conseguenza, gli orari progettati per la Ferrovia Canavesana devono essere compatibili – e, di fatto, subordinati – con quelli programmati per la linea Torino-Milano. Ciò è di centrale importanza a causa del significativo livello di utilizzo della ferrovia Torino-Milano, che fa sì che i treni che lasciano Settimo alla volta di Torino debbano partire all’interno di ben determinate finestre temporali. Questa necessità si impone indirettamente fissando i tempi di arrivo (per i treni dispari) e partenza (per quelli pari) in Settimo, attraverso i vincoli espressi dalle eq.12 ed eq.13. Questi valori vengono fissati al rispettivo valore dell’orario ad oggi in vigore.

Vincolo SE (Stabilità Senso Pari): quanto finora esposto implica che durante l’esercizio i treni debbano arrivare puntuali a Settimo, al fine di entrare nel nodo di Torino rispettando le date finestre temporali. Se così non fosse, ritardi anche di piccola entità verrebbero con tutta probabilità

TABELLA 3 – TABLE 3

Binari di stazione utilizzati dalle tracce base. Il primo numero si riferisce alle tracce dispari (Settimo-Rivarolo-Pont), il secondo alle tracce pari
Station tracks used by the base trips. The first number refers to the odd direction (Settimo – Rivarolo – Pont), the second number to the even direction

Stazione - Station	Sc. 0	Sc. 1 - 3	Sc. 4
Settimo	3 / 3	4 / 5	4 / 5
Volpiano	1 / 2	1 / 2	1 / 2
S.Benigno	2 / 1	2 / 1	2 / 1
Bosconero	1 / 2	1 / 2	1 / 2
Felletto	2 / 1	2 / 1	2 / 1
	3 / 2	3 / 2	
Rivarolo			1 / 2
	1 / 1	1 / 1	
Favria	1 / 1	1 / 1	1 / 2
Cuorgné	1 / 1	1 / 1	2 / 1
Pont	1 / 1	1 / 1	1 / 2

in precise time slots. The same applies to trains arriving in Settimo from Turin. This constraint is indirectly imposed by fixing the arrival (for odd trains) and departure (for even ones) times in Settimo stations, through the constraints expressed by eq.12 and eq.13. These times are fixed to the respective value of the current real timetable.

SE constraint (Stability for the Even direction): the above-explained considerations imply that during operations courses shall arrive on time in Settimo, in order to enter in the Turin node within the programmed time slot. Otherwise, even small delays would probably be amplified. For this reason, on the Canavesana Railway a sort of “stability priority” is accorded to even paths, by providing them with more global buffer time than odd paths. This would ensure, in case of light primary delays⁽³⁾, on-time departures from Settimo station for trains heading to the Turin node. This constraint is expressed by eq. 18 in Appendix 1, imposing that the total dwell time of even paths is longer greater than that of odd paths. Indeed, in a single-track line operated with a periodic timetable the dwell time not necessary for passenger service acts as a buffer time.

Resulting operative scenarios

The operative scenarios used in this analysis are obtained by applying the general constraints and different combinations of the additional constraints. They are described by table 4.

⁽³⁾ Light primary delays are those that can be recovered by trains without resorting to active dispatching.

amplificati. Per questa ragione, sulla Ferrovia Canavesana viene accordata una sorta di “priorità di stabilità” alle tracce pari, garantendo loro un maggiore tempo cuscinetto globale rispetto alle tracce dispari. Questo tende ad assicurare che i treni pari partano in orario da Settimo alla volta di Torino anche in caso di *leggeri ritardi primari*⁽³⁾. Questo vincolo è espresso dall’eq.18 di Appendice 1, imponendo che il tempo di sosta totale delle tracce pari sia maggiore di quello delle tracce dispari, dal momento che, come già esplicitato, in una linea a singolo binario impiegata con orario cadenzato il tempo di sosta non necessario al servizio passeggeri si comporta come un tempo cuscinetto.

Scenari operativi risultanti

Gli scenari operative usati in questa analisi sono ottenuti applicando i vincoli generali e diverse combinazioni di vincoli addizionali. Essi sono descritti in tabella 4.

3.3. Risultati

In tabella 5 si riportano tutti i risultati numerici relativi agli scenari infrastrutturali da 0 a 3. Gli indicatori relativi sono riferiti alle due direzioni di marcia e all’intera circolazione.

Per ciascuna direzione di marcia, il tempo di sosta totale (TDT) è la somma cumulate dei tempi di sosta programmati dall’algoritmo in ciascuna stazione in cui fermano le tracce base. I valori “totali” rappresentano la somma di questi contributi (uno relativo alle tracce pari, l’altro alle tracce dispari) e corrispondono ai valori della funzione obiettivo che viene minimizzata dall’algoritmo di generazione degli orari. I tempi di percorrenza totali (TRT) dipendono unicamente dallo scenario infrastrutturale dal momento che per ciascuna direzione di marcia essi rappresentano la somma cumulativa dei tempi di percorrenza in ciascuna delle tratte intermedie compresa tra una coppia di stazioni consecutive.

3.3.1. Configurazione attuale della sezione Settimo - Rivarolo

Questo paragrafo si concentra sulla configurazione attuale della Ferrovia Canavesana, corrispondente allo sce-

⁽³⁾ Si intendono come “modesti” quei ritardi primari che possono essere recuperati dai treni senza richiedere il passaggio alla gestione operativa della circolazione.

TABELLA 4 – TABLE 4

Scenari operativi utilizzati nell’analisi
Operational scenarios used in the analysis

Scenario operativo <i>Functional scenario</i>		Descrizione <i>Description</i>
1	CA+NE+SE	Scenario che riflette il modo in cui gli scenari vengono attualmente progettati sulla Ferrovia Canavesana, considerando le finestre orarie ad oggi disponibili sulla linea Torino-Milano. <i>Scenario which reflects the actual way in which timetables are designed on the Canavesana Railway, considering the current time slots available in the Turin-Milan main line.</i>
2	NE+SE	Scenario che mette a fuoco l’influenza del vincolo CA sulla configurazione attuale. <i>Scenario which points out the influence of the CA constraint on the actual configuration.</i>
3	CA+NE	Scenario in cui non viene accordata maggiore stabilità alle tracce pari, al fine di evidenziare l’influenza del vincolo SE. <i>Scenario which does not impose more stability to the even paths, in order to point out the influence of the SE constraint on capacity consumption.</i>
4	CA+SE	Scenario in cui non si tiene conto delle finestre di disponibilità della linea Torino-Milano. Questo scenario va dunque a definire quali sarebbero le finestre ottimali che permetto di massimizzare in consumo di capacità della Ferrovia Canavesana. <i>Scenario which neglects the time slots of the Turin-Milan main line. This scenario would actually point out which are the time slots which permit to maximise the capacity consumption of the Canavesana Railway.</i>
5	CA	Scenari in cui si trascura il vincolo SE e si considera la sola influenza individuale dei vincoli CA ed NE. <i>Scenarios in which the SE constraint is neglected and the individual influence of the CA and NE constraints is pointed out.</i>
6	NE	
7	NC	Scenario – utile a rappresentare un riferimento - in cui non viene imposto alcun vincolo addizionale. <i>Scenario in which no additional constraint is applied, useful to fix a baseline reference.</i>

3.3. Results

Table 5 reports all numerical results for the infrastructural scenarios 0 to 3. KPIs are reported for the two single directions as well as for the whole line.

For each running direction, the Total Dwell Time (TDT) is the cumulative sum of the dwell times scheduled by the algorithm in each station where the base path stops. “Total” values represent the sum of these two contributions (even and odd paths) and are the objective function to be minimised by the timetabling algorithm. The total run times depend just on the infrastructural scenario, since for each running direction they represent the cumulative sum of the run times between each line stretch comprised between two consecutive stops.

3.3.1. Current configuration of the Settimo – Rivarolo section

In this paragraph focus is given to the current configuration of the Canavesana Railway, corresponding to the infrastructural scenario 0. In particular, the feasible timeta-

TABELLA 5 – TABLE 5

Panoramica dei risultati numerici dei KPI considerati
Overview of the numerical results of the considered KPIs

<i>infra sc. op. sc.</i>		CA+NE+ SE	NE+ SE	CA+ SE	Sc 0 CA+ NE	CA	NE	NC	CA+NE+ SE	NE+ SE	CA+ SE	Sc1 CA+ NE	CA	NE	NC
DISPARI ODD	TDT (s)	501	300	500	702	702	513	300	500	406	500	701	702	512	300
	TRT (s)	1374	1374	1374	1374	1374	1374	1374	1360	1360	1360	1360	1360	1360	1360
	TTT (s)	1875	1674	1874	2076	2076	1887	1674	1860	1766	1860	2061	2062	1872	1660
	TSM (%)	36.5	21.8	36.4	51.1	51.1	37.3	21.8	36.8	29.9	36.8	51.5	51.6	37.6	22.1
PARI EVEN	TDT (s)	561	572	560	360	360	360	360	561	466	561	360	360	360	360
	TRT (s)	1378	1378	1378	1378	1378	1378	1378	1372	1372	1372	1372	1372	1372	1372
	TTT (s)	1879	1890	1878	1678	1678	1678	1678	1873	1778	1873	1672	1672	1672	1672
	TSM (%)	36.4	37.2	36.3	21.8	21.8	21.8	21.8	36.5	29.6	36.5	21.9	21.9	21.9	21.9
TOTALE TOTAL	TDT (s)	1062	872	1060	1062	1062	873	660	1061	872	1061	1061	1062	872	660
	TRT (s)	2752	2752	2752	2752	2752	2752	2752	2732	2732	2732	2732	2732	2732	2732
	TTT (s)	3754	3564	3752	3754	3754	3565	3352	3733	3544	3733	3733	3734	3544	3332
	TSM (%)	36.4	29.5	36.3	36.4	36.4	29.5	21.8	36.6	29.7	36.6	36.6	36.7	29.7	22.0

<i>infra sc. op. sc.</i>		CA+NE+ SE	NE+ SE	CA+ SE	Sc 2 CA+ NE	CA	NE	NC	CA+NE+ SE	NE+ SE	CA+ SE	Sc3 CA+ NE	CA	NE	NC
DISPARI ODD	TDT (s)	359	300	360	360	360	300	300	360	300	360	360	359	300	300
	TRT (s)	1163	1163	1163	1163	1163	1163	1163	1148	1148	1148	1148	1148	1148	1148
	TTT (s)	1522	1463	1523	1523	1523	1463	1463	1508	1448	1508	1508	1507	1448	1448
	TSM (%)	30.9	25.8	31.0	31.0	31.0	25.8	25.8	31.4	26.1	31.4	31.4	31.3	26.1	26.1
PARI EVEN	TDT (s)	419	375	420	360	360	375	360	420	360	420	360	360	360	360
	TRT (s)	1195	1195	1195	1195	1195	1195	1195	1191	1191	1191	1191	1191	1191	1191
	TTT (s)	1495	1495	1495	1495	1495	1495	1495	1491	1491	1491	1491	1491	1491	1491
	TSM (%)	25.1	25.1	25.1	25.1	25.1	25.1	25.1	25.2	25.2	25.2	25.2	25.2	25.2	25.2
TOTALE TOTAL	TDT (s)	778	675	780	720	720	675	660	780	660	780	720	719	660	660
	TRT (s)	2358	2358	2358	2358	2358	2358	2358	2339	2339	2339	2339	2339	2339	2339
	TTT (s)	3017	2958	3018	3018	3018	2958	2958	2999	2939	2999	2999	2998	2939	2939
	TSM (%)	27.9	25.4	28.0	28.0	28.0	25.4	25.4	28.2	25.7	28.2	28.2	28.2	25.7	25.7

nario infrastrutturale 0. In particolare, si provvede a confrontare gli orari fattibili forniti dall'algoritmo con quelli reali attualmente utilizzati al fine di misurarne il consumo di capacità. La fig. 4 descrive l'andamento del tempo totale di viaggio (TTT): i valori riferiti alle due direzioni di marcia prese singolarmente sono riportati congiuntamente ai valori totali. Quest'ultimo andamento di fatto rappresenta quello della funzione obiettivo dell'algoritmo di generazione degli orari.

Si osserva un calo del tempo di viaggio totale man mano che vengono eliminati dei vincoli. I vincoli NE e CA introdotti singolarmente producono un significativo aumento del TTT rispetto allo scenario NC, pari rispettivamente al 12.7% ed al 24.0%. Le combinazioni CA+NE e CA+SE non modificano il TTT rispetto allo scenario operativo CA. Il vincolo CA è dunque dominante rispetto a quelli NE e SE.

Questo andamento rivela che l'inibizione degli arrivi contemporanei in stazione implica un significativo consumo di capacità, anche nel caso in cui siano applicati altri vincoli. Diversamente, l'imposizione delle finestre tem-

bles obtained with the scheduling algorithm are compared with the real one - currently used - in order to estimate the corresponding capacity consumption. Fig. 4 describes the trend of the TTTV: the values referred to the even and odd directions alone are reported together with the total value. The latter's trend actually depicts that of the objective function of the timetabling algorithm.

As long as constraints are eliminated, the total TTT drops. Constraints NE and CA, singularly introduced, produce a significant increase of the TTT with respect with that of the NC scenario, equal to 12.7% and 24.0% respectively. Combinations CA+NE and CA+SE do not modify the TTT if compared to the CA operative scenario. The CA constraint is therefore dominant with respect to NE and SE.

This trend shows that the prohibition of the simultaneous station arrivals causes a major capacity consumption, even when other constraints are applied. Differently, the imposition of the time slots in the Turin-Milan line affects significantly the capacity consumption only when this constraint is imposed alone.

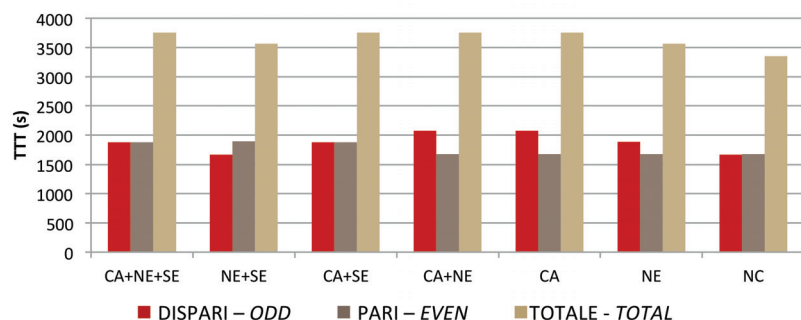


Fig. 4 - Scenario 0: tempi di viaggi totali per gli scenari operativi.

Fig. 4 - Scenario 0: total travel times for operational scenarios.

porali sulla linea Torino-Milano influenza il consumo di capacità solo quando tale vincolo è l'unico in vigore.

Il vincolo SE non influisce significativamente sul valore del tempo di viaggio totale, ma causa – come previsto – una redistribuzione dei tempi di sosta tra le due direzioni di marcia. L'andamento del margine totale di stabilità (TSM) risente di tale fenomeno, come illustrato dalla fig. 5: negli scenari operativi CA+NE+SE, NE+SE e CA+SE il SDM della direzione pari è maggiore o uguale a quello della direzione dispari. Diversamente, negli altri scenari operativi – a direzione dello scenario NC – la direzione pari presenta un TSM significativamente minore di quello riferito alla direzione dispari.

Il confronto tra il tempo di viaggio totale dell'orario reale e quello dello scenario Sc0.CA+NE+SE (tabella 6) permette di determinare quanta parte della capacità disponibile sia utilizzata. Questo confronto deve tenere conto delle assunzioni considerate durante la micro-simulazione delle corse di base, così come del fatto che i tempi di percorrenza dell'orario reale sono alterati – come minimo – dall'approssimazione al minuto che caratterizza l'orario passeggeri. Assumendo che tale approssimazione produca, in media, un incremento di 30 s del TTT per ciascuna stazione incontrata, per un confronto più accurato tale indicatore relativo allo scenario Sc0.CA+NE+SE deve essere aumentato di 180 s, riducendo così i valori di Δ di tabella 6 a 45 e 161 s, rispettivamente per le direzioni dispari e pari.

Il fatto che i tempi di percorrenza reali siano più lunghi di quelli calcolati può spiegare perché i margini di stabilità calcolati per lo scenario Sc0.CA+NE+SE siano maggiori di quelli dell'orario reale. Infatti, la griglia oraria simulata presenta la stessa struttura di quella reale (in particolare, entrambe prevedono incroci in S.Benigno e Feletto, come illustrato dalla fig. 6), dunque i minori tempi di percorrenza parziali (quelli compresi tra due fermate consecutive) producono da una parte una leggera dimi-

The SE constraint does not affect significantly the value of the total travel time, but it causes – as expected – a redistribution of the dwell times between the two running direction. This fact affects the trend of the TSM, as reported by fig. 5: Figure 5: in the operational scenarios CA+NE+SE, NE+SE and CA+SE the TSM of the even direction is greater or equal than that of the odd direction. Differently, in the other operational scenarios the even direction presents a TSM which is – with the exception of scenario NC – significantly lower than that of the odd direction.

The comparison between the TTVT of the real timetable and that of scenario Sc0.CA+NE+SE (table 6) allows to determine how much of the available capacity is used. This comparison shall take into account the assumptions that have been made during the micro-simulation of the base courses, as well as the fact that the running times of the real timetable are altered – at least – by the at-minute rounding necessary for providing a proper customer timetable. Assuming that this would involve, on average, a 30 s increment for each station, for a more effective comparisons the TTT of scenario Sc0.CA+NE+SE should be increased by 180 s, thus reducing the Δ of table 6 Table 6 down to 45 and 161 s for the odd and even directions respectively.

The fact that the real run times are longer than the calculated ones can explicate why the stability margins calculated for scenario Sc0.CA+NE+SE are greater than those of the real timetable. In facts, the simulated timetable grid features the same pattern as the real one (in particular, they both schedule crossings in S. Benigno and Feletto, see fig. 6), therefore the smaller partial run times (i.e., those between two consecutive stops) produce on one hand a minor decrease of the TTTV and on the other hand a significant increase of the stability margins.

The modest size of the differences Δ reported by table 6 – having considered the global accuracy level of this preliminary study – allows to state that the base grid pattern of the current periodic timetable fully exploits the available capacity with the given operative constraints.

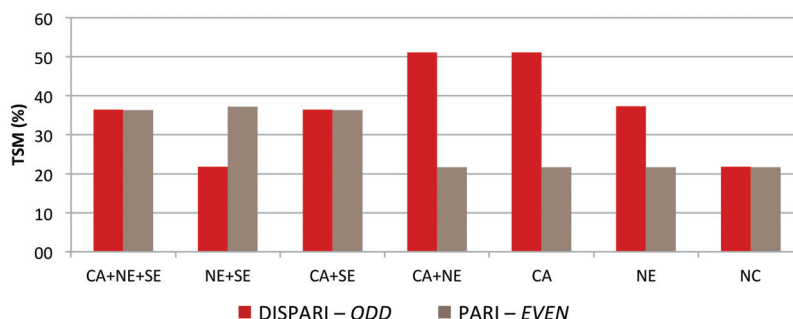


Fig. 5 - Scenario 0: margini di stabilità totali.

Fig. 5 - Scenario 0: total stability margins.

nuzione del tempo di viaggio totale e dall'altra un significativo incremento dei margini di stabilità.

La modesta entità delle differenze Δ riportate in tabella 6 – tenendo presente dell'accuratezza globale richiesta a questo studio preliminare – permette di stabilire che la struttura della griglia di base dell'orario cadenzato attualmente in vigore sfrutta pienamente la capacità disponibile con i dati vincoli operativi.

3.3.2. Interventi infrastrutturali sulla sezione Settimo - Rivarolo

In questo paragrafo si considerano gli interventi infrastrutturali degli scenari 1, 2 e 3, confrontandoli con lo scenario 0 usato come riferimento.

La fig. 7 illustra il TTT degli orari fattibili così ottenuti. Una significativa riduzione del TTT è causata dall'incremento delle massime velocità di linea osservabili nello Sc2, le quali producono una riduzione in media pari al 18% dei tempi di viaggio tra Settimo e Rivarolo. Ad ogni modo la riduzione dei tempi di percorrenza dovuta alle più alte velocità massime di linea causa una riduzione meno che proporzionale nel tempo di viaggio totale corrispondente, come è possibile rinvenire nei risultati di tabella 7.

I risultati dimostrano come l'attivazione dei binari 4 e 5 nella stazione di Settimo non produca effetti significativi in termini di riduzione dei tempi di viaggio. D'altro can-

TABELLA 6 – TABLE 6

TTT dell'orario reale e dell'orario fattibile riferito allo scenario Sc0.AS+NE+SP
TTT of the real timetable and of the feasible timetable of scenario Sc0.AS+NE+SP

Direzione <i>Direction</i>	REALE <i>REAL</i>	AS+NE+SP		Δ (s)	
	TTT (s)	TTT (s)			
DISPARI <i>ODD</i>	2100	1875	(2055)	225	(45)
PARI <i>EVEN</i>	2220	1879	(2059)	341	(161)

3.3.2. Infrastructural interventions on the Settimo – Rivarolo section

In this paragraph the infrastructural interventions of scenarios 1, 2 and 3 are considered and compared to the baseline scenario 0.

Fig. 7 graphically reports the TTT of the so-obtained feasible timetables. A significant reduction of the TTT is caused by the increase of the maximum line speeds of Sc2, which produces an average reduction of about 18% of the travel times between Settimo and Rivarolo. Anyhow, the reduction of the run times due to the higher maximum line speeds causes a less-than-proportional drop in the corresponding total travel times, as pointed out by table 7.

The results show that the activation of tracks 4 and 5 in Settimo does not produce significant effects in terms of reduction of the travel times. On the other side, it is worthwhile to hypothesise that this intervention would introduce some degrees of freedom which could show itself effective during operations in case of traffic perturbations. This could be ascertained through the simulation of the feasible timetables, not included in this preliminary analysis.

In §2.1 it has been explained how the benefits – in terms of capacity increase – deriving from infrastructural interventions on a single-track line operated with periodic timetable shall be analysed considering at the same time the TTV TTT and the TSM. This relationship is illustrated by fig. 8, in which each point represents a feasible timetable qualified by the two KPIs. Points in the top-right corner refer to timetables where capacity is utilised to increase stability rather than to reduce the travel time. On the contrary, points in the bottom-left corner represent timetables in which the TTT is privileged.

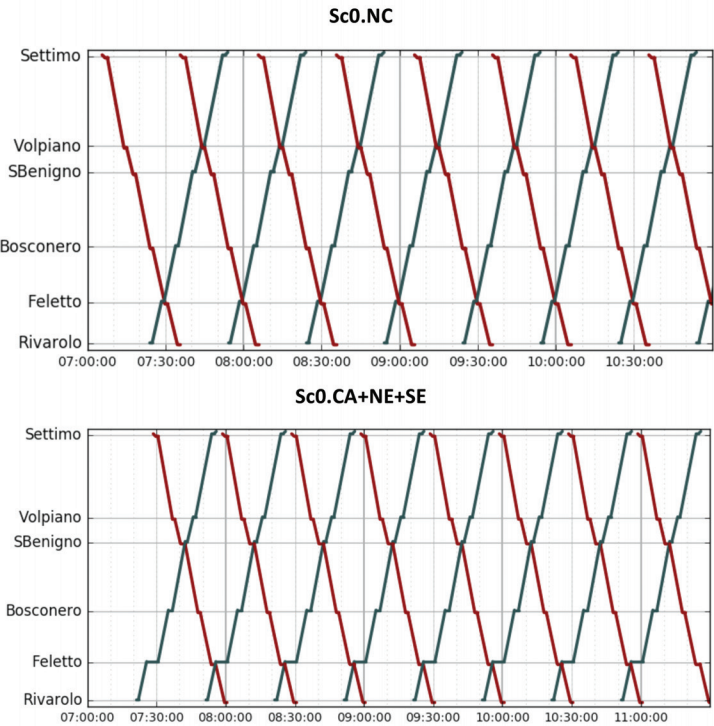


Fig. 6 - Orari grafici degli scenari Sc0.NC e Sc0.CA+NE+SE.
Fig. 6 - Graphical timetables of scenarios Sc0.NC and Sc0.CA+NE+SE.

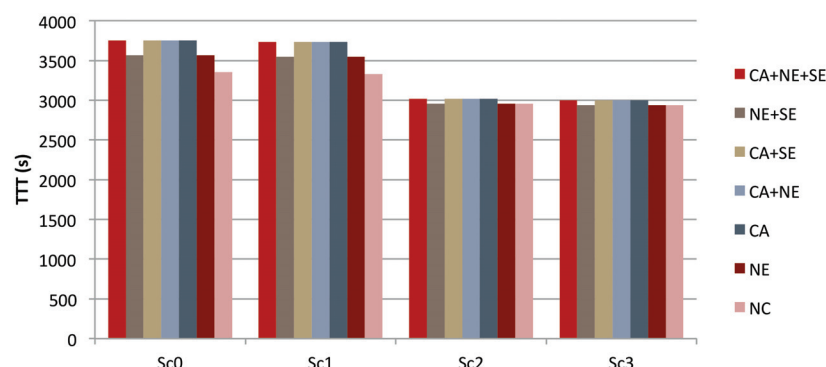


Fig. 7 - Interventi sulla sezione Settimo-Rivarolo: effetti sul tempo di viaggio totale.
Fig. 7 - Interventions of the Settimo-Rivarolo sections: effects of the total travel times.

to si può a ragione prevedere che tale intervento introduca dei gradi di libertà nell'esercizio che possono rivelarsi utili nel caso di perturbazioni della circolazione. Ciò potrebbe essere appurato tramite la simulazione degli orari fattibili, non effettuata in questa analisi preliminare.

Nel §2.1 è stato spiegato come i benefici – in termini di incremento di capacità – derivanti dagli interventi infrastrutturali su una ferrovia a singolo binario impiegata con orario cadenzato debbano essere analizzati considerando congiuntamente gli indicatori TTT ed il TSM. La fig. 8 illustra questa relazione: nel grafico, ciascun punto rappresenta un orario fattibile qualificato dai due indicatori. In punti nell'angolo in alto a destra si riferiscono ad orari in cui la capacità è utilizzata per incrementare la stabilità piuttosto che per ridurre i tempi di viaggio. Al contrario, i punti nell'angolo in basso a sinistra rappresentano orari in cui il tempo totale di viaggio di viaggio è l'indicatore privilegiato.

La curva ottenuta congiungendo i punti relative allo stesso scenario infrastrutturale può essere considerata come l'approssimazione del fronte di Pareto di un processo di ottimizzazione bi-obiettivo, avente come obiettivo la minimizzazione del TTT e la massimizzazione del TSM.

L'incremento di capacità prodotto dagli interventi infrastrutturali è dunque evidenziato dalla progressiva migrazione di queste curve verso la "zona delle soluzioni migliori", vale a dire l'angolo in basso a destra del piano TSM-TTT. Inoltre, la fig. 8 dimostra come ciascuno scenario infrastrutturale "migliorato" produca un insieme di soluzioni (cioè orari fattibili) *dominanti* rispetto allo scenario infrastrutturale precedente.

La fig. 8 rivela che l'attivazione dei binari 4 e 5 a Settimo produce in-

The curve obtained by joining the points relevant to the same infrastructural scenario can be considered as the approximation of the Pareto front of a bi-objective optimisation process, aiming at minimising the TTV TTT and maximising the TSM.

The capacity increase produced by the infrastructural interventions is therefore highlighted by the progressive migration of these curves towards the "best solutions zone", i.e. the bottom-right corner of the TSM-TTT plane. Moreover, fig. 8 shows that each "improved" infrastructural scenario produces a set of solutions (i.e., feasible timetables) which are dominant with respect to the previous infrastructural scenarios.

Fig. 8 reveals that the activation of tracks 4 and 5 in Settimo produces negligible capacity improvements, while major effects are caused by the speed increase, as already pointed out. Moreover, it is possible to recognise how also in scenarios 1,2 and 3 a sharp reduction of the total travel times is caused by the elimination of the CA constraint. Differently, the NE constraint loses its influence in infrastructural scenarios 2 and 3.

3.3.3. Interventions on the Rivarolo–Pont Canavese section

First of all, the electrification of the Rivarolo-Pont Canavese section would make it possible to employ the same electric EMUs utilised on the Settimo-Rivarolo section of the Canavesana Railway. On the other side, simulations highlight that the run times are not affected by the utilisation of the electric TTR instead of the diesel Aln668 (see table 8). This fact can be explained by considering the modest value of the maximum line speed allowed on this section (50 km/h), which does not permit to take advantage from best performances of the TTR in comparison to the Aln668.

TABELLA 7 – TABLE 7

Confronto tra TTT e TRT negli scenari da Sc0 a Sc3
Comparison between TTT and TRT in scenarios Sc0 and Sc3

		Sc0		Sc3			
		CA+NE+SE	NC	CA+NE+SE		NC	
Dispari Odd	TRT (s)	1374	1374	1163	-15.4%	1163	-15.4%
	TTT (s)	1875	1674	1522	-18.8%	1463	-12.6%
Pari Even	TRT (s)	1378	1378	2358	71.1%	1195	-13.3%
	TTT (s)	1879	1678	3017	60.6%	1495	-10.9%

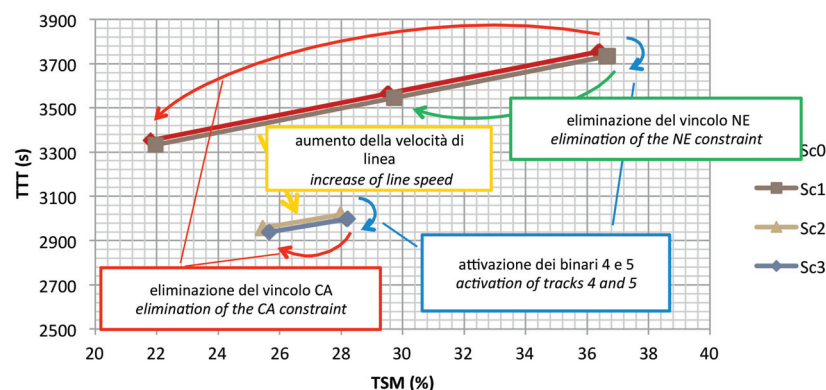


Fig. 8 - Quantificazione dell'aumento di capacità prodotto dagli interventi infrastrutturali.

Fig. 8 - Quantification of the capacity improvements produced by the infrastructural interventions.

crementi di capacità trascurabili, mentre effetti più sensibili sono causati dall'incremento delle velocità di linea, come già rimarcato. Inoltre si può riconoscere come anche negli scenari 1, 2 e 3 l'eliminazione del vincolo CA produca una netta diminuzione del tempo di viaggio totale. Diversamente, il vincolo NE perde la sua influenza negli scenari infrastrutturali 2 e 3.

3.3.3. Interventi sulla sezione Rivarolo-Pont Canavese

In prima istanza l'elettificazione della sezione Rivarolo-Pont Canavese renderebbe possibile l'impiego delle stesse elettromotrici in servizio sulla sezione Settimo – Rivarolo della Ferrovia Canavesana. D'altro canto, le simulazioni hanno evidenziato come i tempi di percorrenza non risentano dell'uso del convoglio elettrico TTR al posto delle automotrici Aln668 (tabella 8) Ciò trova spiegazione nel fatto che le modeste velocità massime di linea ammesse su questa sezione (50 km/h) non permettano di valorizzare le migliori prestazioni cinematiche del TTR rispetto all'Aln668.

Con tali premesse, è opportuno considerare il secondo possibile beneficio dell'elettificazione della tratta in questione, vale a dire la possibilità di effettuare un servizio senza rottura di carico tra Settimo e Pont. Le corse in questione possono essere ottenute tramite il prolungamento di tutte o parte delle tracce cadenzate della sezione Settimo-Rivarolo.

L'attuale regime di esercizio a spola non permette di far circolare più di una corsa alla volta tra Rivarolo e Pont. Con questo vincolo, considerando un tempo di sosta di

With these premises, the second benefit of the electrification of the Rivarolo-Pont section is taken into account, i.e. the possibility of setting up continuous courses between Settimo and Pont. These courses could be obtained by prolonging up to Pont all or part of the periodic paths of the Settimo-Rivarolo sections.

The existing shuttle service configuration does not permit to operate more than one train at time within the whole section Rivarolo-Pont. With this constraint, considering 30 s dwell times in the intermediate stops and a minimum dwell time of 10 min in Pont (necessary for the terminus train operations), the minimum feasible timetable period on this section is equal to about 69 minutes. Therefore, services with period equal to 30 and 60 min are not feasible in the actual configuration. In other words, at least one train out of three arriving in Rivarolo from Settimo could continue up to Pont, for then coming back to Rivarolo and entering the 30 min-period timetable grid again.

In the infrastructural scenario 4, crossings in the intermediate stations of Favria and Cuorgné allow to extend the 30 mins periodic timetable grid to the whole Canavesana Railway. The resulting base grid patterns are graphically illustrated by fig. 9. The timetables obtained for Scenarios CA+NE and CA+SE are actually equal to that relevant to Scenario CA+NE+SE.

In both the NC and CA+NE+SE scenarios crossings are scheduled in Favria and Cuorgné, whose stations shall therefore be equipped with sidings and proper signalling devices. In both these scenarios, just one train at time would dwell in the terminus Pont station, since the arrival of a

TABELLA 8 – TABLE 8

Tempi di percorrenza, in secondi, sulla sezione Rivarolo – Pont Canavese
Run times on the Rivarolo-Pont Canavese sections, in seconds

Direzione Direction	Tratta Line stretch	Aln668	TTR
DISPARI ODD	Rivarolo-Favria	273	273
	Favria-Salassa	153	149
	Salassa-Valperga	205	207
	Valperga-Cuorgné	197	198
	Cuorgné-Campore	287	289
	Campore-Pont Canavese	176	176
PARI EVEN	Pont Canavese -Campore	175	172
	Campore-Cuorgné	289	289
	Cuorgné-Valperga	197	197
	Valperga-Salassa	205	203
	Salassa-Favria	150	150
	Favria-Rivarolo	284	283

30 s nelle fermate intermedie ed un tempo di sosta minimo di 10 minuti in Pont (necessario per le operazioni di giro-banco) il minimo periodo di cadenzamento sull'intera sezione risulta pari a circa 69 minuti. Orari con cadenzamento di 30 o 60 minuti non sono dunque fattibili nella configurazione attuale. In altre parole, al massimo un treno ogni tre in arrivo a Rivarolo da Settimo potrebbe continuare fino a Pont per poi ritornare indietro ed inserirsi di nuovo nella griglia oraria cadenzata ai 30 minuti.

Nello scenario infrastrutturale 4 le stazioni intermedie di Favria e Cuorgné vengono abilitate agli incroci, permettendo così di estendere la griglia oraria cadenzata ai 30 minuti all'intera Ferrovia Canavesana. Le griglie orarie così risultanti sono illustrate dalla fig. 9. Gli orari ottenuti per gli scenari operativi CA+NE e CA+SE sono identici a quelli dello scenario CA+NE+SE.

Sia nello scenario NC che in CA+NE+SE gli incroci sono programmati nelle stazioni di Favria e Cuorgné, giustificando dunque il loro attrezzaggio a tal fine, tramite binari di incrocio e segnalamento adeguato. In entrambi questi scenari, nella stazione terminale di Pont sosterebbe al più un treno alla volta, in quanto l'arrivo di un treno da Rivarolo e la ripartenza successiva sono separate da più di 10 minuti. Come conseguenza, questo orario non richiederebbe di attivare altri binari nella stazione di Pont, in quanto essa non dovrebbe ospitare più di un treno per volta.

La tabella 9 riporta l'andamento del TTT e del TSM per lo scenario infrastrutturale 4. Considerando lo scenario operativo NC, l'intero viaggio tra Settimo e Pont Canavesana dura circa 1 ora 5 min nel senso dispari e 1h 7 min nel senso pari. Nel caso dell'applicazione dei vincoli CA, NE e SE, questi valori sono rispettivamente uguali a 1 ora 2 min e 1 ora 17 min.

4. Conclusioni

L'articolo ha presentato un'analisi di capacità effettuata sulla Ferrovia Canavesana, una ferrovia suburbana a singolo binario impiegata con orario cadenzato. L'analisi è stata condotta tramite un approccio di studio basato sugli orari, in cui la capacità è stimata tramite opportuni indicatori calcolati su orari fattibili.

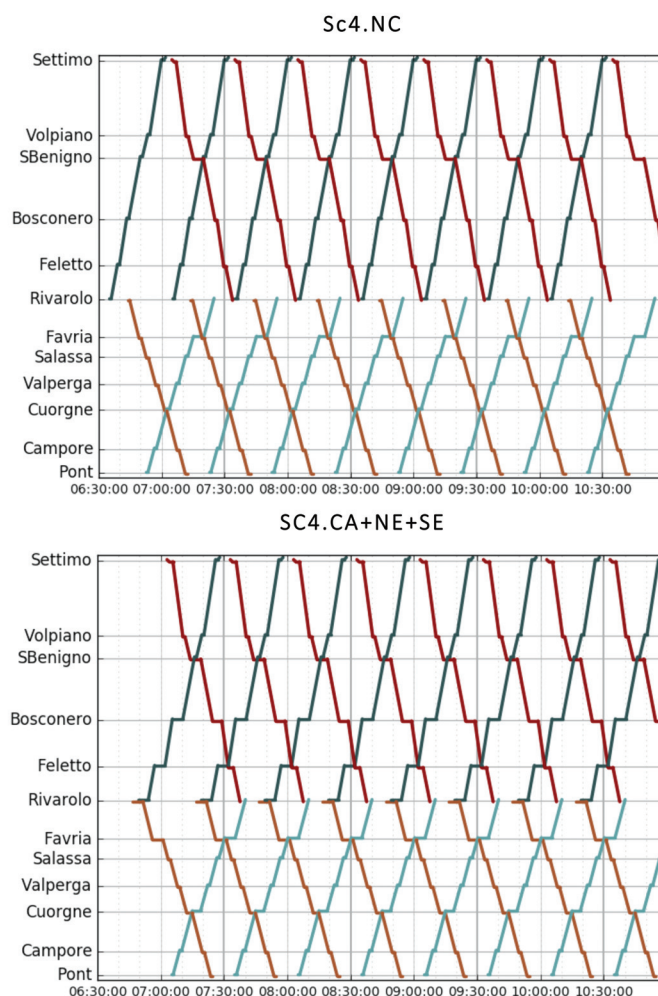


Fig. 9 - Orari grafici degli scenari Sc4.NC ed Sc4.CA+NE+SE.
Fig. 9 - Graphical timetables of scenarios Sc4.NC and Sc4.CA+NE+SE.

train from Rivarolo and the departure of the following one are separated by more than 10 minutes. As a consequence, this timetable does not require to activate any siding in Pont station, since no more than one train at time would dwell there.

Table 9 reports the trend of TTT and TSM for infrastructural scenario 4. Considering operative scenario NC, the whole travel from Settimo to Pont takes about 1h5 min and 1h7min for odd and even directions respectively. In case of applying constraints CA, NE and SE, these values are equal to 1h2min and 1h17min.

4. Conclusions

The paper has presented a capacity analysis carried out on the Canavesana Railway, a suburban single-track line operated with periodic timetables. The analysis has been performed using a timetable-based approach, in which ca-

Nel §2 si è fornita una panoramica del metodo utilizzato, descrivendo l'ambiente micro-simulazione ed il modello MILP impiegato per la generazione automatica degli orari fattibili. Gli scenari utilizzati nell'analisi di capacità sono stati presentati nel §3.2, introducendo la differenziazione tra scenari operativi ed infrastrutturali ed i vincoli utilizzati per caratterizzare i secondi. Infine, i risultati sono stati esposti e discussi nel §3.3.

I risultati hanno evidenziato come l'inibizione degli arrivi simultanei in stazione rappresenti un vincolo importante. Se esso fosse eliminato grazie ad adeguati adeguamenti infrastrutturali e tecnologici – non ancora previsti – i tempi di viaggio totali potrebbero essere ridotti fino al 10%, nello scenario infrastrutturale 0 usato come riferimento.

I risultati relativi agli interventi infrastrutturali pianificati per la sezione Settimo-Rivarolo hanno confermato questo andamento, evidenziando come l'incremento delle velocità massime di linea possa permettere una netta riduzione dei tempi di viaggio totali. Diversamente, l'attivazione dei binari 4 e 5 nella stazione di Settimo non induce benefici significativi sul tempo di viaggio. Il vincolo di utilizzazione delle date finestre temporali nella linea Torino-Milano ha un'influenza sensibile solo negli scenari infrastrutturali in cui la velocità di linea non viene incrementata.

La tabella 10 fornisce una panoramica generale degli effetti dei detti interventi infrastrutturali, nel caso in cui si trascuri il vincolo EN. La tabella mostra come gli interventi causino una decrescita costante di entrambi gli indicatori TTT e TSM.

Per quanto riguarda la sezione Rivarolo – Pont Canavese, attualmente non elettrificata, si è evidenziato come la sua elettrificazione ed il contestuale utilizzo di materiale rotabile elettrico non causi significative alterazione dei tempi di percorrenza, anche se produrrebbe risparmi energetici e ovvie ricadute positive sugli inquinamenti acustico ed atmosferico. Inoltre, nell'attuale configurazione, non è possibile programmare un orario cadenzato coordinato con quello applicato sulla sezione Settimo-Rivarolo. A tal fine, è necessario utilizzare le stazioni di Favria e Cuorgné per effettuare degli incroci.

Come anticipato, questo studio ha carattere preliminare, e vuole costituire un riferimento iniziale per l'analisi definitiva, avviata nel settembre 2017. In particolare, nell'analisi definitiva sono stati introdotti i seguenti miglioramenti di modello e metodo:

- L'algoritmo di micro-simulazione è stato migliorato al fine di modellare con precisione gli effetti dell'attivazione di SCMT sui profili di marcia. In particolare, si prende in considerazione il fatto che in certi casi SCMT impone il vincolo di rispettare la velocità di rilascio a 30 km/h sugli itinerari di stazione altrimenti percorribili a velocità più elevata. Ciò verosimilmente produce un innalzamento dei tempi di percorrenza interstazione, controbilanciando parzialmente i benefici

TABELLA 9 – TABLE 9

Tempi di viaggio e margini di stabilità delle tracce programmate sull'intera Ferrovia Canavesana nello scenario infrastrutturale 4

Travel times and stability margins of the paths covering the whole Canavesana Railway in infrastructural scenario 4

		NC	CA+NE+SE
DISPARI ODD	TRT (s)	2437	2437
	TTT (s)	3920	3696
	TSM (%)	37.8	34.1
PARI EVEN	TRT (s)	2524	2524
	TTT (s)	4037	4620
	TSM (%)	37.5	45.4
TOTALE TOTAL	TRT (s)	4961	4961
	TTT (s)	7957	8316
	TSM (%)	37.7	40.3

capacity has been assessed through proper KPIs evaluated on feasible timetables.

In §3.2 the paper has provided an overview of the utilised method, describing the microscopic simulation environment as well as the MILP model utilised for the automatic generation of feasible timetables. The scenarios utilised in the capacity analysis have then been addressed and presented in §3.2, describing the differentiation between infrastructural and operative scenarios and the constraints introduced for characterising the second ones. Results have finally been shown and discussed in §3.3.

Results have highlighted how a major constraint is represented by prohibition of simultaneous train arrivals at stations. If this constraint was eliminated by proper technological and infrastructural improvements – not planned yet – the total travel times could be reduced up to 10 % in the baseline scenario 0.

Results relevant to the infrastructural improvements planned for the Settimo-Rivarolo sections confirmed this fact, highlighting how the increase of the maximum line speeds could permit a sharp reduction of the total travel times. Differently, the activation of tracks 4 and 5 in Settimo does not have significant benefits to this KPI. The constraint of respecting given utilisation timeslots in the Turin-Milan line has a major influence just in the scenarios featuring lower maximum line speeds.

Table 10 provides a general overview of the effects of the considered infrastructural improvements, in the case in which the EN constraint is neglected. The table shows how the interventions causes a constant decrease of both the TTT and TSM KPIs.

A far as the Rivarolo-Pont Canavese section is concerned, considering that currently it is not electrified, it has been highlighted how the electrification and the utilisation of electric rolling stock would not produce significant modifications of the run times, though of course it would pro-

- delle maggiori velocità di linea autorizzabili in presenza di SCMT;
- La stabilità è valutata tramite la simulazione in condizioni di circolazione perturbata ed il seguente calcolo di indicatori ex-post, al posto di valutare l'indicatore ex-ante margine totale di stabilità sugli orari nominali;
 - Si fa uso dell'assegnazione attiva degli itinerari (re-routing) al fine di avvicinare gli orari fattibili prodotti a quelli realmente adoperati oltre che per effettuare le simulazioni in condizioni di circolazione perturbata evitando l'occorrenza di deadlock. Oltre ad altri benefici, questa integrazione permette di valutare compiutamente gli effetti dell'attivazione dei binari 4 e 5 nella stazione di Settimo.
 - In questa analisi non si è tenuto conto della gestione della flotta di materiale rotabile utilizzata sulla Ferrovia Canavesana. Questa gestione è influenzata dai tempi di viaggio complessivi, dalle loro ricadute sul tempo-ciclo totale delle corse della linea 1 del SFM e quindi dal numero di convogli necessari per effettuare il servizio pianificato. In particolare, la possibile estensione delle corse SFM fino a Pont Canavese (sc.4) potrebbe avere un impatto non trascurabile sul tempo-ciclo complessivo, dal momento che lo innalzerebbe di più di un'ora. Nell'analisi definitiva, questo impatto viene considerato.

Infine, nell'analisi definitiva viene ridotto il numero degli scenari infrastrutturali ed operative analizzati, considerando solo quelli attualmente previsti nel piano di adeguamento di GTT per i prossimi anni.

La ricerca descritta in questo articolo è stata sviluppata come parte di un Contratto di Ricerca tra il Politecnico di Torino, DIATI, Sistemi di Trasporto e Gruppo Torinese Trasporti. L'autore intende ringraziare il Dipartimento di afferenza e gli ingegneri Gian Piero FANTINI, Pier Galileo LA SCALA, Gianpiero NOVARETTI e Elisabetta PONTE (GTT, in ordine alfabetico) i quali hanno fornito il supporto tecnico necessario oltre ad un continuo ed utile confronto sui risultati ottenuti.

Appendice 1

Secondo la teoria del blocco fisso [30], i circuiti di binario (CB) possono essere utilizzati al più da un treno alla volta. L'utilizzo di un CB inizia quando il sistema di segnalamento lo riserva per un certo treno e termina quan-

TABELLA 10 – TABLE 10

Interventi infrastrutturali sulla Ferrovia Canavesana: panoramica finale
Infrastructural interventions on the Canavesana Railway: final overview

Sezione Settimo-Rivarolo - <i>Settimo-Rivarolo section</i>		
Intervento - <i>Intervention</i>	Δ % TTT	Δ % TSM
I) Attivazione dei binari 4 e 5 nella stazione di Settimo <i>I) Activation of tracks 4 and 5 in Settimo</i>	-0.6	0.6
II) Autorizzazione degli arrivi contemporanei <i>II) Permission of contemporaneous entries</i>	-10.7	-40.8
III) Aumento delle massime velocità di linea <i>III) Increase of maximum line speeds</i>	-19.6	-23.1
IV) II + III	-21.2	-30.1
V) I + II + III	-21.7	-29.5
Sezione Rivarolo-Pont Canavese - <i>Rivarolo-Pont Canavese section</i>		
Intervento - <i>Intervention</i>	fattibilità orario cadenzato a 30 min <i>feasibility of 30 min periodic timetable</i>	
Elettificazione <i>Electrification</i>	NO	
Attivazione delle stazioni di Favria, Cuorné e Pont (opzionale) <i>Activation of Favria, Cuorné and Pont (optional) stations</i>	SÌ YES	

vide energy saving, noise reduction and air quality. With the actual configuration, it is furthermore impossible to schedule a periodic timetable coordinated with that applied on the Settimo-Rivarolo section. To this purpose, it is necessary to use the stations of Favria and Cuorné for scheduling train crossings.

As anticipated, the presented study is a preliminary one, which was intended to act as a useful reference framework for the definitive analysis, which has been carried on since September 2017. In particular, in the definitive analysis several improvements are implemented in the method and in the models, namely:

- The microscopic simulation algorithm is improved in order to fully model the effects of the activation of the SCMT control system on the run profiles. In particular, it is taken into consideration that in certain cases SCMT imposes the 30 km/h release speed to station routes which can be crossed – in the absence of SCMT – at full speed. This fact would likely produce an increase in the run times between stations, partially counteracting the benefits of the higher line speeds available with SCMT;
- Stability is evaluated through the simulation with perturbed traffic conditions and the subsequent calculation of ex-post KPIs, rather than through the computation of the ex-ante KPI Total Stability Margin on the nominal timetables;
- Re-routing is used in order to get feasible timetables closer to that used in reality as well to perform the simulations of the feasible timetables with perturbed traffic

do il sistema rileva che la coda di detto treno abbandona il CB. A questo punto il CB può essere riservato per altri treni. Si definisce inoltre l'occupazione di un CB come l'intervallo di tempo in cui tutto o in parte il treno in questione si trova fisicamente al suo interno (fig. A1).

Il modello di generazione orari si compone dei seguenti oggetti principali:

- Gli *itinerari* (I), definiti come sequenze di CB;
- I *percorsi* (T), definiti da un itinerario associato ad un tipo di materiale rotabile ed ai tempi di percorrenza in ciascun CB. Un percorso descrive anche il numero e la posizione delle fermate previste lungo l'itinerario, ma non i relativi tempi di sosta;
- Le *linee* (L), che descrivono il servizio passeggeri che compone un orario cadenzato. Le linee sono innanzitutto caratterizzate da un periodo; in secondo luogo, per ciascuna direzione di marcia d (treni "pari" e "dispari"), descrivono:
 - Il tempo di entrata della prima corsa appartenente a quella linea e direzione (tempi di entrata di base), e_d ;
 - Il percorso t_d utilizzato dalle corse appartenenti a quella linea e direzione;
 - I tempi di sosta in ciascuna fermata del percorso.
 - The trip t_d used by the courses belonging to that line and direction;

Le *corse* (C), che di fatto rappresentano le tracce-treno presenti nell'orario. Le corse sono definite in generale come un percorso associato ad un orario che descrive il tempo di entrata nel sistema ed i tempi di sosta in ciascuna fermata del percorso. Dal momento che nel modello presentato tutte le corse sono associate ad una linea, l'informazione riguardante i tempi di sosta e di entrata viene fornita dall'oggetto linea. A ciascuna corsa è inoltre associato un indice progressivo k che descrive la "posizione" della traccia all'interno della griglia cadenzata associata alla linea-direzione relativa.

La fig. A1 fornisce una rappresentazione grafica degli intervalli d'utilizzazione e d'occupazione dei CB riferiti ad una data corsa, evidenziandone la relazione col profilo di marcia della stessa corsa calcolato nel modello microscopico. È illustrato come gli intervalli d'utilizzazione e d'occupazione siano composti da diversi apporti, la cui entità è definita dai percorsi. In particolare, se un percorso t presenta una fermata nel CB ω , il tempo di percorrenza è definito come la somma

$$rt_t^\omega = rt_t^\omega(1) + rt_t^\omega(2) \quad (2)$$

dove $rt_t^\omega(1)$ è il tempo di percorrenza in ω fino alla fermata e $rt_t^\omega(2)$ è il tempo compreso tra la partenza del treno e l'istante in cui la sua testa lascia il CB.

Itinerari e percorsi fanno parte dell'insieme di dati d'ingresso automaticamente preparato dal livello 1, insie-

avoiding deadlocks. Among other benefits, this would allow to properly point out the possible benefits produced by the activation of tracks 4 and 5 in Settimo;

- In this analysis the management of the rolling stock fleets utilised on the Canavesana Railway has not been considered. This management is influenced by the overall travel times, by their effects on the total cycle-time of the courses of the SFM line 1 and therefore by the number of trains necessary to the planned service. In particular, the possible extension of the SFM trains up to Pont Canavese (Sc. 4) would have a not-negligible impact on the overall cycle-time, increasing it by more than one hour. In the definitive analysis, this impact is considered.

Finally, in the definitive analysis the number of the studied infrastructural and operational scenarios is reduced, considering just those which belong to the actual GTT improvement plan for the next years.

The research described in this paper has been developed as a part of a Research Contract between Politecnico di Torino, DIATI, Transport Systems and Gruppo Torinese Trasporti. The author would like to thank the DIATI department at PoliTO and eng. Gian Piero FANTINI, Pier Galileo LA SCALA, Gianpiero NOVARETTI and Elisabetta PONTE (GTT, in alphabetical order) who provided the technical support for the presented analysis, as well as a continuous and useful feedback about the provided results.

Appendix 1

According to the blocking time theory [30], TDSs can be utilised by just one train at time. The utilisation of a TDS starts when the signalling system reserves it for a certain train and ends when the tail of this train leaves the TDS and the signalling system releases it. At this point the TDS can be reserved by other trains. Moreover, the occupation of a TDS is defined as the time span in which a part of the considered train physically stays within it (see fig. A1).

The timetabling model is composed by the following main objects:

- The *itineraries* (I), defined as sequences of TDSs;
- The *trips* (T), which are defined by an itinerary associated to a rolling stock type and the run times in each TDS. A trip includes also the information about number and position of the stops that are scheduled along the itinerary, but not about the amount of the relevant dwell times;
- The *lines* (L), which actually describe the passenger services composing a periodic timetable. Lines are characterised first of all by a period. Secondly, for each running direction d ("even" and "odd" trains) the line object reports:
 - The entry time of the first course belonging to that line and direction (base entry times), e_d ;

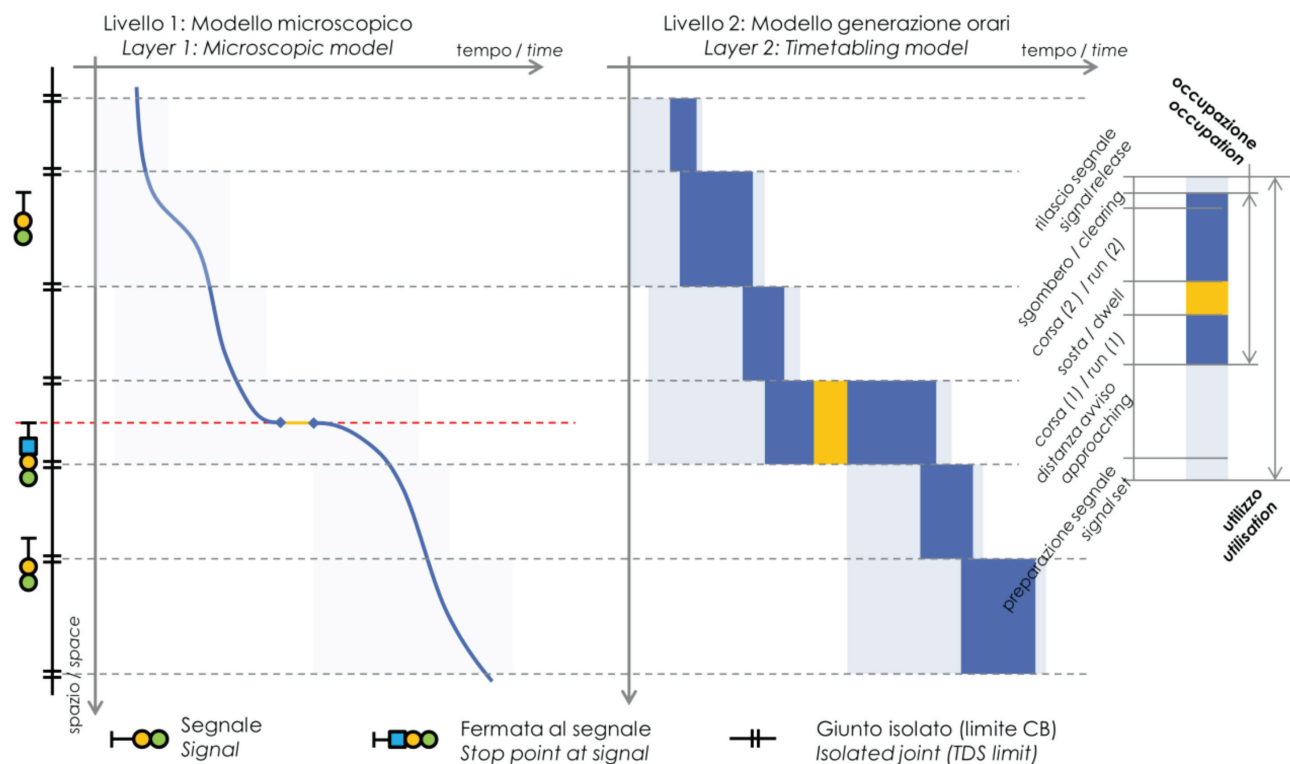


Fig. A1 - Utilizzazione e occupazione dei circuiti di binario nel modello di generazione orari di SASTRE.
Fig. A1 - Utilisation and occupation of TDSs in the timetabling model of SASTRE.

me ai minimi distanziamenti temporali imposti dal sistema di segnalamento. Quest'ultimi possono essere definiti per ciascun CB e per ciascuna coppia di percorsi che utilizzano quel CB. Tuttavia, al fine di ridurre il numero di vincoli del modello di generazione orari, i distanziamenti sono definiti per insiemi di CB detti sezioni di distanziamento (HS). Le sezioni di distanziamento sono definite seguendo i due criteri seguenti:

1. In tutti i CB della stessa HS, no varia numero e tipo dei percorsi che li utilizzano;
2. Ciascun CB in cui almeno un percorso presenta una fermata costituisce da sola una HS.

Dal momento che un CB può appartenere al più ad una HS, un percorso si può intendere anche come una sequenza ordinata di sezioni di distanziamento. La fig. A2 fornisce un esempio della decomposizione in HS di una semplice infrastruttura.

Per ogni HS e ciascuna coppia ordinate di percorsi che la utilizzano ($t1$; $t2$) i minimi distanziamenti temporali sono definiti come $h_{t1,t2}^i$. Nel caso di una HS in cui il primo percorso della coppia presenta una fermata, il distanziamento si intende riferito ad una fermata con tempo di sosta nullo. Ciascuna HS è inoltre qualificata dal tempo di percorrenza rt_t^i di ciascun percorso t , dato dalla somma dei tempi di percorrenza di t in ciascun CB ω componente la HS:

- The trip t_d used by the courses belonging to that line and direction;
 - The dwell times in each stop of the trip.
- The courses (C), which actually represent the train paths figuring in the timetable. Courses are in general defined as a trip associated to a timetable describing the entry time in the system and the dwell time in each stop point of the train trip. Since in the presented model all the courses are associated to a line, the dwell times information is provided by the line object. To each course is then associated a progressive index k which describes the "position" of the path within the periodic grid associated to a line and to a direction.

Figure A1 provides a graphical representation of the TDS utilisation and occupation time intervals relevant to a course, highlighting the relationship with the run profile of the same course in the microscopic model. It is illustrated how the occupation and the utilisation intervals are composed by several factors, whose entity is provided by the trips. In particular, if a trip t features a stop in a TDS ω , the run time is defined as the sum

$$rt_t^\omega = rt_t^\omega(1) + rt_t^\omega(2) \quad (2)$$

where $rt_t^\omega(1)$ is the run time in ω until the stop and $rt_t^\omega(2)$ is the time comprised between the train departure and the instant in which its head leaves the TDS.

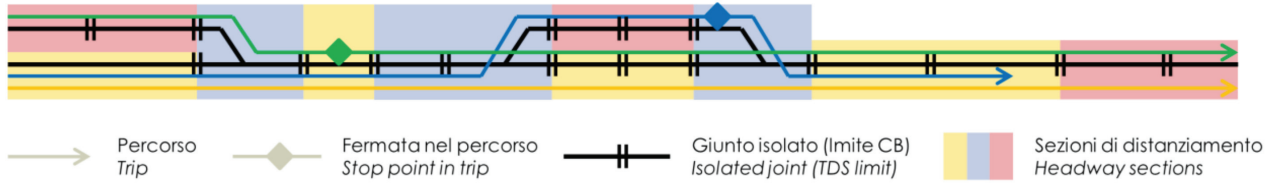


Fig. A2 - Esempio di decomposizione di un'infrastruttura composta da 16 CB e utilizzata da 3 percorsi in 10 HS.
Fig. A2 - Example of the decomposition into 10 headway sections of an infrastructure composed by 16 TDSs and utilised by 3

$$rt_t^i = \sum_{\forall \omega \in i} rt_t^\omega \quad (3)$$

Facendo uso di questi oggetti, si definisce il modello di generazione orari come un modello di Programmazione Lineare Misto-Intera, che include le seguenti variabili di base:

- I tempi di entrata di base $e_{l,d} \in [\underline{T}, \bar{T}]$ per ciascuna linea l e ciascuna direzione d , dove \underline{T} and \bar{T} rappresentano rispettivamente i limiti inferiore e superiore del periodo di riferimento per la generazione dell'orario;
- Il tempo di sosta $dw_j \in [dw_{MIN}, dw_{MAX}]$, con $dw_{MIN} \geq 0$, definite per ciascuna fermata j del percorso $t_{l,d}$ associato alla direzione d della linea l ;
- Per ciascuna HS i e ciascuna coppia non ordinate di corse $\{c1; c2\}$, una variabile binaria $y_{c1,c2}^i$

$$y_{c1,c2}^i = \begin{cases} 1 & \text{se } c1 \text{ utilizza } i \text{ prima di } c2 \\ 0 & \text{altrimenti} \end{cases} \quad (4)$$

Al fine di ottenere un orario fattibile in cui siano rispettati I minimi distanziamenti temporalis i impongono I vincoli seguenti per ciascuna coppia di corse $c1$ e $c2$ utilizzanti la HS i :

$$s_{c1}^i + h_{t1,t2}^i + D_{c1}^i - M \cdot (1 - y_{c1,c2}^i) + bt^i \leq s_{c2}^i \quad (5)$$

$$s_{c2}^i + h_{t2,t1}^i + D_{c2}^i + M \cdot y_{c1,c2}^i + bt^i \leq s_{c1}^i \quad (6)$$

Dove $D_c^i = dw_j$ se la corsa presenta una fermata j all'interno della HS i , e $D_c^i = 0$ altrimenti. Il termine bt^i rappresenta un minimo tempo cuscinetto che può essere imposto in ciascuna sezione di distanziamento.

s_c^i è il tempo in cui la corsa c inizia ad utilizzare la HS i . Assumendo che c utilizzi il percorso t e appartenga alla linea l in direzione d con indice k , s_c^i rimane definita dalla somma di tre termini

$$s_c^i = E_c + R_c^i + DW_c^i \quad (7)$$

Itineraries as well as trips are included in the input data set which is automatically arranged by layer 1, together with the minimum headways imposed by the signalling system. The latter can be defined for each TDS and for each couple of trips which actually utilise that TDS. However, in order to reduce the number of constraints of the timetabling model, the headways are defined for sets of TDSs called headway sections (HS). Headways sections are defined according to the following two criteria:

1. The number and type of the trips shall be the same in all the TDSs composing the HS;
2. A TDS, where at least one trip features a stop, constitutes – alone – a HS.

Since a TDS cannot belong to more than one HS, a trip can also be seen as an ordered sequence of headway sections. An example of the headway sections decomposition of a simple infrastructure is provided by fig. A2.

For each HS i and for each ordered pair of trips utilising it ($t1; t2$) the minimum headways are therefore defined as $h_{t1,t2}^i$. In case of a HS in which the first trip of the pair contains a stop, the headway is intended to refer to a stop with 0 dwell time. Each HS also contains the run time rt_t^i for each trip t , given by the sum of the run times of that trip in each TDS ω which composes the HS:

$$rt_t^i = \sum_{\forall \omega \in i} rt_t^\omega \quad (3)$$

Using these objects, the timetabling model is defined as a Mixed Integer Linear Programming model, which includes the following base variables:

- The base entry time $e_{l,d} \in [\underline{T}, \bar{T}]$ for each line l and each direction d , where \underline{T} and \bar{T} represent respectively the lower and the upper bounds of the timetabling period;
- The dwell time $dw_j \in [dw_{MIN}, dw_{MAX}]$, with $dw_{MIN} \geq 0$, defined for each stop point j of the trip $t_{l,d}$ associated to direction d of line l ;
- For each HS i and each not ordered pair of courses $\{c1; c2\}$, a binary variable $y_{c1,c2}^i$

$$y_{c1,c2}^i = \begin{cases} 1 & \text{if } c1 \text{ utilises } i \text{ before } c2 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

$$E_c = e_{l,a} + p_l \cdot k \quad (8)$$

$$R_c^i = \sum rt_t^l \quad \forall HS \ l \in P^i \quad (9)$$

$$DW_c^i = \sum dw_j, \quad \forall \text{ fermata } j \text{ appartenente ad una HS } \in P^i \quad (10)$$

Questi vincoli sono formulati seguendo il “metodo della grande M”, che permette di collegare i valori delle variabili reali e binarie. Minore è il valore di M , maggiore sarà la velocità di risoluzione del modello. Nel modello presentato, il valore di M è definito come

$$M = \max [E_c + \sum_{l \in t} rt_t^l + \sum_{j \in t} dw_j] \quad \forall c \quad (11)$$

La formulazione fin qui esposta assicura la generazione di orari fattibili. Per gli scopi del presente studio, sono definiti tre vincoli aggiuntivi:

- L'imposizione dei tempi di arrivo o partenza in una data stazione;
- L'imposizione di un distanziamento temporale minimo tra due arrivi consecutivi in una data stazione;
- L'imposizione che il tempo di sosta complessivo associato ad una data direzione di una certa linea sia no maggiore di quello relativo alla direzione opposta.

Si può imporre ad una corsa c un dato tempo di arrivo o partenza (rispettivamente A_c^i e D_c^i) in una data fermata j (posta all'interno del CB ω) attraverso i vincoli

$$A_c^i = E_c + R_c^\omega + DW_c^\omega + rt_c^\omega(1) \quad (= arr_c^j) \quad (12)$$

$$D_c^i = E_c + R_c^\omega + DW_c^\omega + rt_c^\omega(1) + dw_j \quad (= dep_c^j) \quad (13)$$

dove R_c^ω e DW_c^ω sono definiti analogamente alle eq. 8 and 9, ma considerando i CB al posto delle HS.

$$R_c^\omega = \sum rt_t^l \quad \forall TDS \ \lambda \in \Pi^\omega, \text{ dove } \Pi^\omega \text{ è l'insieme dei CB che precedono } \omega \text{ in } t \quad (14)$$

$$DW_c^\omega = \sum dw_p, \quad \forall \text{ fermata } p \text{ appartenente ad un CB } \in \Pi^\omega \quad (15)$$

Al fine di inibire gli arrivi in simultanea nelle stazioni di incrocio, viene definito un vincolo che impone che gli arrivi di due corse $c1$ e $c2$ rispettivamente nelle fermate $j1$ e $j2$ debba essere separato come minimo dal distanziamento $sh_{j1,j2}$. A tal fine è definita una variabile binaria addizionale $\gamma_{c1,c2}^{j1,j2}$ come

$$\gamma_{c1,c2}^{j1,j2} = \begin{cases} 1 & \text{se } c1 \text{ arriva in } j1 \text{ prima che } c2 \text{ arrivi in } j2 \\ 0 & \text{altrimenti} \end{cases} \quad (16)$$

In order to get a feasible timetable in which the minimum headways are respected, the following constraints are imposed for each couple of course $c1$ and $c2$ utilising the HS i :

$$s_{c1}^i + h_{t1,t2}^i + D_{c1}^i - M \cdot (1 - \gamma_{c1,c2}^i) + bt^i \leq s_{c2}^i \quad (5)$$

$$s_{c2}^i + h_{t2,t1}^i + D_{c2}^i + M \cdot \gamma_{c1,c2}^i + bt^i \leq s_{c1}^i \quad (6)$$

Where $D_c^i = dw_j$ if the course has a stop point j within the HS i , and $D_c^i = 0$ otherwise. The term bt^i represents a minimum buffer time that can be enforced in each headway section.

s_c^i is the time in which course c starts utilising HS i . Assuming that c uses the trip t and belongs to line l with direction d with index k , s_c^i is defined as the sum of three terms

$$s_c^i = E_c + R_c^i + DW_c^i \quad (7)$$

$$E_c = e_{l,a} + p_l \cdot k \quad (8)$$

$$R_c^i = \sum rt_t^l \quad \forall HS \ l \in P^i \quad (9)$$

$$DW_c^i = \sum dw_j, \quad \forall \text{ stop point } j \text{ belonging to a HS } \in P^i \quad (10)$$

These constraints are included according to the “big M method”, which permits to link the values of the real and binary variables. The performances in solving the model are improved by M values as small as possible. In our model, the value of M is defined as

$$M = \max [E_c + \sum_{l \in t} rt_t^l + \sum_{j \in t} dw_j] \quad \forall c \quad (11)$$

The formulation such exposed ensure the generation of feasible timetables. To the purposes of this study, three additional constraints are defined, namely:

- The imposition of arrival or departure times at a given station;
- The imposition of given minimum headways between two consecutive arrivals in a given station;
- The imposition that the overall dwell time associated to a run direction of a certain line are not greater than that relevant to the other direction.

It is possible to impose to a course c given arrival or departure times (A_c^i and D_c^i respectively) in a given timing point j (sited within the TDS ω) through setting

$$A_c^i = E_c + R_c^\omega + DW_c^\omega + rt_c^\omega(1) \quad (= arr_c^j) \quad (12)$$

$$D_c^i = E_c + R_c^\omega + DW_c^\omega + rt_c^\omega(1) + dw_j \quad (= dep_c^j) \quad (13)$$

where R_c^ω and DW_c^ω are defined similarly to eq. 8 and 9, but considering the TDSs instead of the HSs.

$$R_c^\omega = \sum rt_t^l \quad \forall TDS \ \lambda \in \Pi^\omega, \text{ where } \Pi^\omega \text{ is the set of TDSs preceding } \omega \text{ in } t \quad (14)$$

grazie al quale si esprimono i seguenti due vincoli

$$arr_{c1}^{j1} + sh_{j1,j2} - M \cdot (1 - \gamma_{c1,c2}^{j1,j2}) \leq arr_{c2}^{j2} \quad (17)$$

$$arr_{c2}^{j2} + sh_{j2,j1} + M \cdot \gamma_{c1,c2}^{j1,j2} \leq arr_{c1}^{j1} \quad (18)$$

Con riferimento ad una certa linea l , si può imporre che una direzione $d1$ non sia penalizzata – in termini di tempo di viaggio totale – rispetto a quella opposta $d2$. Questo vincolo impedisce, per esempio, che i treni marcianti in direzione $d1$ siano sempre quelli che si fermano ed aspettano nelle stazioni sede incrocio in una linea a singolo binario. Il vincolo risultante è

$$\sum_{j1 \in t1} dw_{j1} \leq \sum_{j2 \in t2} dw_{j2} \quad (19)$$

dove $t1$ e $t2$ sono i percorsi associati, nella detta linea l , dai treni marcianti rispettivamente nelle direzioni $d1$ e $d2$.

Una coincidenza tra due corse $c1$ e $c2$, imposta in riferimento alla coppia di fermate $j1$ e $j2$, è un vincolo che impone che $c2$ parta da $j2$ all'interno di una certa finestra temporale successiva all'arrivo di $c1$ in $j1$. Avendo definito $0 \leq \delta_1 \leq \delta_2$, si formalizza il vincolo

$$arr_{c1}^{j1} + \delta_1 \leq dep_{c2}^{j2} \leq arr_{c1}^{j1} + \delta_2 \quad (20)$$

Si deve infine definire una funzione obiettivo per la risoluzione del modello. In questo studio si generano gli orari fattibili minimizzando il tempo di viaggio totale dei convogli. Dal momento che esso è dato dalla somma dei tempi di percorrenza totali (costanti in questo modello) e dei tempi di sosta totali, la funzione obiettivo minimizzerà quest'ultima quantità, estesa a tutte le direzioni di marcia di tutte le linee definite nel modello

$$f.o.: \text{minimizzare} \left(\sum_{\forall l} \sum_{\forall d \in l} \sum_{j \in t} dw_j \right) \quad (21)$$

Dove t è il percorso associato alla direzione d della linea l .

Si può approfittare della natura cadenzata degli orari da generare per ridurre il numero delle variabili y descritte dall'eq.4, così come dei vincoli espressi dalle eq.5 e 6. Infatti questi vincoli sono implicitamente soddisfatti – potendo dunque essere trascurati nella formulazione del modello – per ciascuna coppia di corse appartenenti alla stessa direzione di marcia della stessa linea, posto che il periodo di cadenzamento sia maggiore del massimo distanziamento temporale da rispettare lungo il percorso.

$$DW_c^\omega = \sum dw_p, \forall \text{ stop point } p \text{ belonging to a TDS} \in \Pi^\omega \quad (15)$$

In order to avoid simultaneous arrivals in crossing stations, a constraint is defined, which imposes that the arrivals of two courses $c1$ and $c2$ at the stopping points $j1$ and $j2$ respectively shall be separated at least by the minimum headway $sh_{j1,j2}$. To this purpose, an additional binary variable $\gamma_{c1,c2}^{j1,j2}$ is defined

$$\gamma_{c1,c2}^{j1,j2} = \begin{cases} 1 & \text{if } c1 \text{ arrives in } j1 \text{ before } c2 \text{ arrives in } j2 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (16)$$

with which the two following constraints are expressed

$$arr_{c1}^{j1} + sh_{j1,j2} - M \cdot (1 - \gamma_{c1,c2}^{j1,j2}) \leq arr_{c2}^{j2} \quad (17)$$

$$arr_{c2}^{j2} + sh_{j2,j1} + M \cdot \gamma_{c1,c2}^{j1,j2} \leq arr_{c1}^{j1} \quad (18)$$

With reference to a certain line l , we can impose that a direction $d1$ shall not be penalised – in terms of total travel time – in respect to the opposite one $d2$. This constraint avoids, for instance, that trains running in direction $d1$ are always those which stop and wait in all the crossing stations of a single-track line. The resulting constraint is

$$\sum_{j1 \in t1} dw_{j1} \leq \sum_{j2 \in t2} dw_{j2} \quad (19)$$

where $t1$ and $t2$ are the trips that in line l are utilised by trains running in directions $d1$ and $d2$ respectively.

A connection between two courses $c1$ and $c2$, set with reference to a couple of stop points $j1$ and $j2$, is a constraint that imposes that $c2$ depart from $j2$ within a given time slot successive to the arrival of $c1$ in $j1$. Having set $0 \leq \delta_1 \leq \delta_2$, this is formalised by the constraint

$$arr_{c1}^{j1} + \delta_1 \leq dep_{c2}^{j2} \leq arr_{c1}^{j1} + \delta_2 \quad (20)$$

Finally, an objective function shall be set in order to solve the model. In this study, we generate the feasible timetables by minimising the total travel time of trains. Since this is given by the sum of total run time (which is fixed in this model) and total dwell time, the objective function minimises this latter quantity, extended to all the running direction of all the lines defined within the model

$$o.f.: \text{minimise} \left(\sum_{\forall l} \sum_{\forall d \in l} \sum_{j \in t} dw_j \right) \quad (21)$$

where t is the trip associated to the direction d of line l .

It is possible to take advantage of the periodical nature of the timetables to be arranged in order to reduce the number of the y variables described by eq. 3, as well as of the constraints expressed by eq. 4 and 5. In fact, these constraints are implicitly satisfied – and therefore they can be

Inoltre alcune coppie di corse possono trovarsi nella situazione di non condividere mai un CB, una HS o una fermata all'interno del periodo di riferimento, sebbene i loro itinerari presentino CB in comune. Ciò dipende dai limiti inferiore e superiore imposti ai rispettivi tempi di entrata e di sosta. In tal caso può essere operata un'ulteriore riduzione delle variabili y e γ e dei vincoli relativi.

Il modello MILP è risolto con l'algoritmo del simplesso incluso nel solutore commerciale GUROBI 7.0.1 [34].

neglected in the solution model - for each couple of courses belonging to the same running direction of the same line, provided that the line period is large enough.

Moreover, depending on the lower and upper bounds set to the entry and dwell times, certain pairs of courses never share a TDS, a HS or a station stop within the timetabling period even if their itineraries overlap. This allows for a further reduction of the y and γ variables as well as of the relevant constraints.

The MILP model is solved with the simplex algorithm provided by the commercial solver GUROBI 7.0.1 [34].

BIBLIOGRAFIA - REFERENCES

- [1] LANDEX A., 2009, *Evaluation of railway networks with single track operation using the UIC 406 capacity method*, Networks and Spatial Economics, 9(1), 7-23.
- [2] LINDNER T., PACHL J., 2009, *Recommendations for enhancing UIC code 406 method to evaluate railroad infrastructure capacity*, proceedings of the 89th Annual Meeting of the Transportation Research Board, 1-15.
- [3] COVIELLO N., DALLA CHIARA B., NELLDAL B.L., 2014, *An assessment model of the single-track line carrying capacity: influence of the signalling system and application to the Trans-Mongolian railways*, Ingegneria Ferroviaria, LXIX(7-8), 627-651.
- [4] REITANI G., MALASPINA R., 1995, *La potenzialità di circolazione ferroviaria su linee a singolo binario: un modello di calcolo*, Ingegneria Ferroviaria, n. 8/1995, pp. 616-623.
- [5] International Union of Railways (UIC), 2013, *Capacity, UIC code 406 R*, 2nd edition, 1-51.
- [6] ROTOLI F., RICCI S., NAVAJAS CAWOOD E., MALAVASI G., 2015, *Capacity versus punctuality assessment procedures and accessibility measures for rail networks*, Ingegneria Ferroviaria, LXX(12), 1011-1040.
- [7] BURDETT R.L., KOZAN E., 2006, *Techniques for absolute capacity determination in railways*, Transportation Research Part B: Methodological, 40(8), 616-632.
- [8] KONTAXI E., RICCI S., 2009, *Tecniche e metodologie per la determinazione della capacità ferroviaria: analisi comparata e prospettive d'integrazione*, Ingegneria Ferroviaria, LXIV(12), 1051- 1080.
- [9] CALETTI L., COLOMBO G., DALL'ALBA R., MASTELLA G., TACCHI G., 2014, *The stochastic simulation of the node Milano Nord Bovisa Politecnico*, Ingegneria Ferroviaria, LXIX(7-8), 655-670.
- [10] SOGIN S.L., LAI Y.C., DICK C.T., BARKAN C.P.L., 2013, *Analyzing the incremental transition from single to double track railway line*, Proceeding of the 2013 Joint Rail Conference, 1-9.
- [11] ATANASSOV I., DICK C.T., BARKAN C.P.L., 2014, *Siding spacing and the incremental capacity of the transition from single to double track*, Proceedings of the 2014 Joint Rail Conference, 1-7.
- [12] ATANASSOV I., DICK C.T., 2015, *Incremental capacity in transitioning from double to triple track on shared rail corridors*, Proceedings of the IAROR 6th International Conference on Railway Operations Modelling and Analysis, Tokyo, 1-9.
- [13] SIPILÄ H., 2015, *A simulation based framework for evaluating effects of infrastructure improvements on scheduled and operational delays*, Proceedings of the IAROR 6th International Conference on Railway Operations, Modelling and Analysis, Tokyo.
- [14] ABRIL M., BARBER F., INGOLOTTI L., SALIDO M.A., TORMOS P., LOVA A., 2008, *An assessment of railway capacity*, Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 44(5), 774-806.
- [15] COVIELLO N., PELLEGRINI P., SOBIEJAS RICHARD S., RODRIGUEZ J., 2017, *Stability of saturated timetables: the influence of buffer times*, Proceedings of the IAROR 7th International Conference on Railway Operations, Modelling and Analysis, Lille.

- [16] GOVERDE R.M.P., BESINOVIC N., BINDER A., CACCHIANI V., QUAGLIETTA E., ROBERTI R., TOTH P., 2015, *A three level framework for performance-based railway timetabling*, Proceedings of the IAROR 6th International Conference on Railway Operations Modelling and Analysis, Tokyo, 1-20.
- [17] EMERY D., 2010, *Increasing the capacity of a single-track line*, Proceedings of the 10th Swiss Transport Research Conference, 1-14.
- [18] BOYSEN H., 2012, *Quicker Meets, Heavier Loads and Faster Empties – Effects on Transportation Capacity and Cycle time*, report for Bothnian Green Logistic Corridor, 1-8.
- [19] COVIELLO N., 2015, *Modelling periodic operations on single track lines: timetable design and stability evaluation*, RETREC (Research in Transportation Economics, (special issue on Rail Operations, Management and Economics), 54(2015), 2-14.
- [20] BARBER F., ABRIL M., SALIDO M.A., INGOLOTTI L., TORMOS P., LOVA A., 2007, *Survey of automated systems for railway management*, Universidad Politécnica di Valencia, Internal Technical Report, 1-65.
- [21] WATSON R., MEDEOSSI G., 2014. §10 in HANSEN I., PACHL J., (2014), *Railway Timetabling and Operations*, Chapters on Analysis, Modelling, Optimisation, Simulation, Performance Evaluation. ISBN 978-3-7771-0462-1, 2nd edition, Eurailpress, Hamburg, Germany.
- [22] PALOTTO F., COVIELLO N., 2016, *A capacity assessment of the railways serving the ports of Savona and Vado: solutions for setting up effective freight services*, Ingegneria Ferroviaria LXXI(4), 297-328.
- [23] COVIELLO N., DALLA CHIARA B., RICCI S., 2015, *Scheduling algorithms for rail operations and the automatic generation of timetables: application for railway capacity and perturbation evaluation*, Ingegneria Ferroviaria, LXX(10), 1-26.
- [24] CAIMI G., KROON L., LIEBCHEN C., 2017, *Model for railway timetable optimisation: Applicability and applications in practice*, Journal of Rail Transport Planning and Management, 6(2017), 285-312.
- [25] CACCHIANI V., TOTH P., 2012, *Nominal and robust train timetabling problems*, European Journal of Operational Research, 219(3), 727-737.
- [26] LUSBY R., LARSEN J., EHRGOTT M., RYAN D., 2011, *Railway track allocation: models and methods*, OR Spectr. 33(4), 843-883.
- [27] PELLEGRINI P., MARLIERE G., RODRIGUEZ J., 2014, *Optimal train routing and scheduling for managing traffic perturbations in complex junctions*, Transportation Research Part B, Methodological, 59(2014), 58-80.
- [28] PELLEGRINI P., MARLIERE G., NEAMATIAN-NONEMI R., RODRIGUEZ J., ORUS J., DE NITTO M., MICHENOT P., 2015, *Sigifret - simulations d'une gestion innovante des circulations fret: Rapport final*, in French, Programme de Recherche et D'Innovation dans les Transports terrestres (PREDIT), 1-255.
- [29] PELLEGRINI P., MARLIERE G., RODRIGUEZ J., 2017, *RECIFE-SAT: a MILP-based algorithm for the saturation of railway timetables*, Technical report, IFSTTAR, Université Lille Nord de France, Lille, France.
- [30] HANSEN I., PACHL J., 2014, *Railway Timetabling and Operations*. ISBN 978-3-7771-0462-1, 2nd edition, Eurailpress, Hamburg, Germany.
- [31] CAREY M., 1999, *Ex ante heuristic measures of scheduled reliability*, Transportation Research Part B: Methodological, 33(7), 473-494.
- [32] GOVERDE R.M.P., HANSEN I.A., 2013, *Performance Indicators for Railway Timetables*, Proceedings of the IEEE International Conference on Intelligent Rail Transportation (ICIRT), 301-306.
- [33] ANDERSSON E., PETERSON A., TÖRNQUIST KRASEMANN J., 2013, *Introducing a New Quantitative Measure of Railway Timetable Robustness Based on Critical Points*, IAROR 5th International Conference on Railway Operations Modelling and Analysis, Copenhagen, 1-19.
- [34] Gurobi Optimizer, version 7.0.1, reference manual available at <http://www.gurobi.com/documentation/>