



La simulazione stocastica del nodo di Milano Nord Bovisa Politecnico

The stochastic simulation of the node Milano Nord Bovisa Politecnico

Sig.ra. Laura CALETTI(*)
 Sig. Giuseppe COLOMBO(*)
 Dott. Ing. Roberto DALL'ALBA(**)
 Dott. Ing. Giorgio MASTELLA(**)
 Dott. Ing. Gianluca TACCHI(*)

1. Premessa

FerrovieNord SpA e NET Engineering SpA hanno collaborato per sviluppare uno studio mirato ad analizzare in profondità il nodo di Milano Nord Bovisa Politecnico, una delle principali stazioni della rete di FerrovieNord, in cui convergono più linee e dove vi è quindi il rischio che eventuali perturbazioni sulla circolazione in una linea si propaghino nelle altre. La stazione è inoltre un punto di passaggio obbligato per la quasi totalità dei collegamenti di FerrovieNord, quindi rappresenta un nodo centrale per qualsiasi ipotesi di sviluppo futuro dell'esercizio.

Lo studio ha l'obiettivo di implementare un modello di simulazione del comportamento reale dell'esercizio ferroviario nel nodo di Milano Nord Bovisa Politecnico, con tutti i ritardi e le instabilità rilevabili nel caso reale.

Per lo sviluppo del progetto sono stati raccolti i dati di puntualità degli arrivi e delle partenze nella stazione, per ogni treno e per più giorni consecutivi: le informazioni sono state codificate e inserite in OpenTrack®[1] sotto forma di variabili stocastiche (le cui caratteristiche saranno descritte nelle pagine successive), affinché il simulatore potesse rappresentare una situazione più complessa e realistica del consueto scenario deterministico descritto nell'orario di servizio. Si tratta della prima simulazione ferroviaria con elementi stocastici condotta sulla rete di FerrovieNord, ed uno dei primi esempi in Italia.

2. Lo scopo del lavoro

La simulazione di reti ferroviarie è un procedimento in cui, mediante un apposito software, si riproduce il comportamento di un sistema rete-servizi al fine di valutarne le performance e le caratteristiche.

1. Preface

FerrovieNord and NET Engineering have cooperated with the aim of developing a study focusing on Milano Nord Bovisa Politecnico hub, one of the main stations of FerrovieNord network where more lines cross each other and there is a higher probability that delays affecting trains in one line may influence traffic regularity on other lines as well. Moreover, since nearly all services managed by FerrovieNord are passing through this station, this main node always has to be evaluated when proposing hypothesis for new services.

The aim of this study is the implementation of a simulation model of Milano Nord Bovisa hub which may be able to represent all the delays and the instability that may be detected in the actual exploitation.

In the framework of the study, punctuality data of arrivals and departures in Milano Bovisa were collected for each train and for more days: all information were treated and coded in OpenTrack® [1] as stochastic variables, whose characteristics will be described in the next pages. In this way the simulator could represent the network in a more complex and realistic way, going beyond the typical deterministic scenario described in the service timetable. It is the first example of stochastic simulation for FerrovieNord network and one of the few in Italy.

2. Foreword: the purpose of the work

Railways networks simulation reproduces through a software tool the behaviour of a system composed by network and relevant services, in order to evaluate performances and to calculate indicators. Some of the most sig-

(*) Ferrovienord S.p.A. - Unità Produzione Tracce.

(**) NET Engineering S.p.A.

(*) Ferrovienord S.p.A. - Unità Produzione Tracce.

(**) NET Engineering S.p.A.

Alcuni fondamentali indicatori relativi ad un'infrastruttura ferroviaria, come la capacità di una linea o di un nodo, non sono determinabili a priori se non in modo empirico ed indicativo. La capacità di una linea, infatti, dipende dalla tipologia di traffico, dal segnalamento, dalle regole di circolazione, dalle caratteristiche plano-altimetriche del tracciato e dalle performance dei mezzi di trazione [2].

La simulazione, permettendo di rappresentare la marcia in tempo reale dei treni secondo le regole di circolazione e le prescrizioni dell'orario, consente di ottenere risultati con una fedeltà alla realtà superiore a quella delle formule empiriche [3].

Nell'ambito dell'esercizio ferroviario la maggior parte dei parametri, quali ad esempio: velocità, accelerazione, prestazioni dei mezzi, tempi di percorrenza, tempi di manovra dei deviatori, tempi di fermata, lunghezza delle tratte, è fissata a priori da regolamenti o procedure per ogni linea, corsa, stazione o rotabile. In realtà determinati aspetti possono essere suscettibili di variazioni anche cospicue. Per esempio, ogni macchinista ha un proprio tempo di reazione per mettere in marcia il treno una volta che il segnale è disposto a via libera ed ha libertà di disporre delle caratteristiche di accelerazione e frenatura del treno.

Altri elementi tipicamente stocastici sono i tempi di incarrozzamento legati fortemente alla variabilità di comportamento dei passeggeri, nel tempo e nello spazio. Possono poi esservi piccoli o grandi inconvenienti che ritardano di pochi secondi o di molti minuti la marcia dei treni e che possono dar luogo a fenomeni di asincronia sulla regolarità di altri treni consecutivi o coincidenti. Quando si utilizza un modello di simulazione di una rete ferroviaria per valutare la robustezza del programma di esercizio e la sua capacità di risposta di fronte a eventi specifici, diventa fondamentale introdurre la variabilità statistica dei parametri dell'esercizio ferroviario [4].

In questo modo, combinazioni casuali di eventi a favore o sfavore della puntualità possono generare situazioni ben diverse rispetto al funzionamento indisturbato della rete. Un adeguato numero di simulazioni stocastiche può portare alla definizione di scenari limite, dove si verificano le conseguenze e le ripercussioni di combinazioni di fattori sfavorevoli.

In generale, lo studio vuole inquadrarsi in un più ampio disegno che mira alla realizzazione di sistemi di trasporto sempre più efficaci, efficienti ed attrattivi ([5], [6], [7]), attraverso il supporto di informazioni sempre più dettagliate e realistiche da fornire a tecnici e decisori. A questo proposito si noti come anche in letteratura vi sia la tendenza a voler introdurre metodologie più raffinate ed innovative per la qualificazione e la quantificazione della qualità offerta dai servizi di trasporto collettivo, come per esempio in [8].

In particolare, nello studio in esame, si sono implementati parametri stocastici per investigare il comportamento di una specifica stazione, ovvero Milano Nord Bovispa Politecnico. A partire da un rilevamento della puntualità, si è costruita una serie di indicatori statistici relativi alla probabilità che in ogni fascia oraria ed in ogni linea un treno arrivi puntuale o in ritardo, e con quale entità.

nificant indicators for a railway infrastructure, such as the capacity of a line or of a node, cannot be described through theoretical constructs: empirical calculations give indicative results. The capacity of a line, in fact, depends on traffic typology, on signalling, on traffic regulation, on line topography and on rolling stock performances [2]. Simulation allows representing the movement of the trains in a network according to traffic rules and to exploitation prescriptions: results are then more accurate than the indication of empiric formulas [3].

In the framework of railway networks exploitations, the greatest part of the parameters used for network analysis (speed and acceleration limits, rolling stock performance, travel times, switches operation time, station stops time, travel distances) are considered as fixed: procedures, regulations or technical standards impose specific values for each line, service, station or rolling stock. On the contrary, in everyday life, all indicators are subject to changes. For instance, each engine driver has got a different reaction time to start the train once the signal shows authorization for departure, and is free to choose the performance level for acceleration and braking. Other variable elements are boarding times, which are linked to variability on the number of passengers in time and in space. There could also be some small or important unforeseen problems, which have an impact on the regular run of the trains, causing few seconds or lots of minutes of delay. This may also affect other trains in sequence or in connection. When a railway simulation model is implemented for testing the robustness of a timetable and the possibility for the system to face specific events, it is necessary to introduce the statistical variability of railway operations [4].

In this way, random combinations of events which may affect or improve punctuality may generate scenarios which differ a lot from the standard expected behaviour of the network. An adequate number of stochastic simulations may lead to determine the scenarios describing the consequences and the impacts of the worst combination of events.

In general, this study is proposed in the framework of a wider plan with the aim of creating more effective, efficient and attractive transport systems ([5], [6], [7]). This objective can be reached throughout the production of more realistic and more detailed information for technicians and decision makers. Also in scientific literature it is possible to see how new innovative methodologies are proposed to describe and quantify the of the proposed service quality, such as in [8].

In particular, during this analysis, the stochastic parameters were implemented in order to study the behaviour of a specific station, which is Milano Nord Bovispa Politecnico. Starting from a punctuality survey, a series of statistic indicators was created in order to describe the probability that a certain train in a certain time slot may be punctual or delayed, and which is the importance of the delay.

3. La rete di FerrovieNord ed il nodo di Milano Nord Bovisa Politecnico

La rete gestita da FerrovieNord si sviluppa radialmente dal centro di Milano lungo le direttrici Seveso-Camnago-Asso tramite il nodo di Seveso, Varese-Laveno, Como e Novara-Malpensa attraverso il nodo di Saronno. La stazione di Milano Nord Bovisa Politecnico (di seguito indicata come Bovisa) costituisce la diramazione delle linee per le direttrici sopra descritte, nelle quali avviene l'interscambio tra i servizi Regionali e Suburbani (fig. 1).

L'impianto, caratterizzato da 8 binari di ricevimento, si collega, tramite un sistema di comunicazioni, al contesto infrastrutturale della rete FerrovieNord.

Il sistema di comunicazioni della stazione di Bovisa è rappresentato in fig. 2 attraverso tre differenti tipologie di schematizzazioni: quella dell'orario di servizio⁽¹⁾, quella del simulatore OpenTrack® e quella del sistema SCCT (descritto nel successivo par. 4)⁽²⁾.

Questi i collegamenti lato nord:

- due binari costituenti la linea diretta dedicati ai servizi Regionali non aventi fermata nella tratta Bovisa-Saronno;
- due binari costituenti la linea locale dedicati ai servizi Suburbani con fermate intermedie nella tratta Bovisa-Saronno;
- due binari costituenti la linea diretta dedicati ai servizi Regionali e Suburbani nella tratta Bovisa-Seveso-Asso;
- un binario costituente la linea locale da/per Affori.

In direzione sud, invece, si trovano:

- quattro binari per Milano Cadorna (due per la linea diretta dedicati in prevalenza ai treni Regionali/Express delle direttrici Varese-Laveno, Como, Novara e Malpensa e due per la linea locale, dedicati in prevalenza ai servizi Regionali della direttrice Seveso-Asso e ai servizi Suburbani S3 da/per Saronno e S4 da/per Camnago);
- due binari che si congiungono al Passante Ferroviario (RFI) dedicati ai servizi Suburbani S1 da/per Saronno e S2 da/per Mariano Comense;
- due binari che si congiungono al Posto Movimento Milano Ghisolfi (RFI) e dedicati al servizio Regionale/Express della direttrice Milano Centrale-Malpensa.

⁽¹⁾ FerrovieNord: "Orario di Servizio Edizione dicembre 2010" e "Prefazione Orario di Servizio".

⁽²⁾ Tali rappresentazioni sono ovviamente identiche, in quanto si riferiscono alla stessa topologia reale. Si noti però come nell'immagine relativa ad OT si riconosce la struttura di archi e nodi propria del grafo ferroviario, nonché il segnalamento, mentre nell'immagine SCCT di possono osservare le interruzioni dei circuiti di binario e gli stati dei deviatori.

3. FerrovieNord network and Milano Nord Bovisa Politecnico hub

The network managed by FerrovieNord has its origin in the city of Milan and is composed of radial connections with Seveso, Camnago and Asso through Seveso junction and Varese-Laveno, Como and Novara-Malpensa Airport through Saronno junction. Milano Nord Bovisa Politecnico is the hub from which all these lines depart and where there is the interchange between regional services and local commuter trains (fig. 1). Milano Nord Bovisa Politecnico is a through station with eight tracks: system of junctions and connections allows all lines to be connected with each other. The station layout is shown in fig. 2 throughout three different types of schemes: Ferrovienord internal service timetable⁽¹⁾, OpenTrack® simulator and SCCT system, described in paragraph 4⁽²⁾.

Links in northern side of the station are:

- *the two tracks of the direct line dedicated to the non-stop regional services between Bovisa and Saronno;*
- *the two tracks of the commuter line dedicated to suburban service with intermediate stops between Bovisa and Saronno;*
- *the two tracks of the direct line dedicated both to regional and commuter services between Bovisa, Seveso and Asso;*
- *the one-track commuter line to/from Affori.*

In the southern side of the station there are:

- *the four tracks to/from Milano Cadorna terminus station (two tracks mainly for the regional line, dedicated to regional and express trains of Varese – Laveno – Como and Novara – Malpensa lines; the other two tracks dedicated to regional trains of Seveso – Asso line and commuter trains S3 to/from Saronno and S4 to/from Camnago);*
- *the two tracks connecting Bovisa with Milan Passante Railway, used by S1 suburban services to/from Saronno and S4 suburban services to/from Camnago;*
- *the two tracks connecting Bovisa with RFI's Posto Movimento Milano Ghisolfi, dedicated to regional and express services between Milano Centrale main station and Malpensa airport.*

⁽¹⁾ Data collected from FerrovieNord documents "Orario di Servizio Edizione dicembre 2010" (Service timetable, december 2010 edition) and "Prefazione Orario di Servizio" (Service timetable foreword).

⁽²⁾ These three drawing are obviously identical, as they represent the same layout. Nevertheless, in the OpenTrack simulator representation it is possible to find the node/edge structure of a graph, plus the signals, whereas in SCCT drawing the represented information are the state of the switches and the interruption of track circuits.

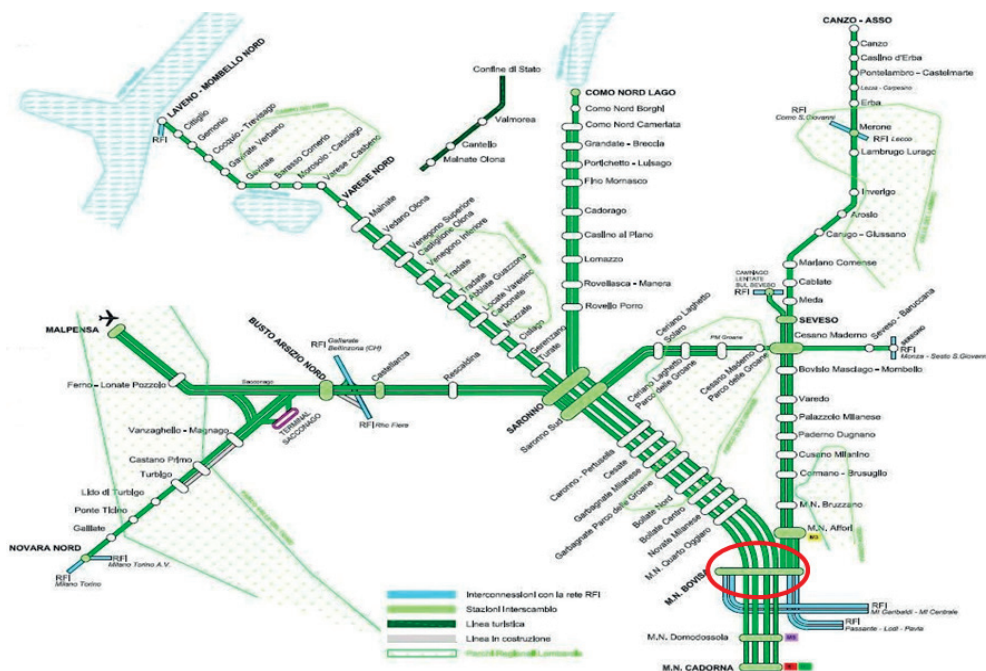


Fig. 1 - Posizione della stazione di Bovisa all'interno della rete di FNM.
Fig. 1 - Position of Bovisa station in the framework of FerrovieNord network.

I transiti di treni viaggiatori nel giorno feriale sono ripartiti tra le diverse tratte come mostrato in tabella 1.

4. Il simulatore OpenTrack® e la rappresentazione della rete ferroviaria di FerrovieNord

Il simulatore OpenTrack®, in dotazione all'Unità Monitoraggio Circolazione del Servizio Circolazione di FerrovieNord⁽³⁾, è utilizzato principalmente per:

- valutazioni della sostenibilità dell'orario in seguito all'attivazione di un nuovo orario di servizio secondo diversi livelli di performance;

The number of trains passing through Milano Nord Bovisa Politecnico in the average working day is shown in table 1.

4. OpenTrack® train simulator and FerrovieNord network model

OpenTrack® train simulator, a resource of the Circulation Monitoring Unit of FerrovieNord⁽³⁾ Circulation Service, is mainly used for:

- evaluation of new timetable sustainability, according to different levels of performances;

⁽³⁾ FerrovieNord SpA è la società appartenente al Gruppo FNM che gestisce la rete delle ferrovie di proprietà regionale affidate in concessione al gruppo. La rete è composta da più di 300 km di linea, 120 stazioni dislocate nell'hinterland a nord di Milano e nelle province di Milano, Varese, Como, Novara, Brescia e vi transitano circa 800 treni al giorno. FerrovieNord SpA si occupa inoltre della manutenzione ordinaria e straordinaria della rete, del suo adeguamento e dell'assistenza ai lavori di potenziamento, nonché delle attivazioni di nuovi impianti. FerrovieNord SpA ha sviluppato un modello di simulazione dell'esercizio ferroviario, basato su OpenTrack®, e correntemente utilizzato per rappresentare lo stato attuale dell'esercizio e per verificarne nuove soluzioni, per valutare l'impatto di modifiche all'infrastruttura e il comportamento di nuovi materiali rotabili.

⁽³⁾ FerrovieNord S.p.A. is an Italian company belonging to the FNM Group and managing the regional railway network that is granted in concession to the Group. The network is composed of 300 km of lines with 120 stations, all placed in the area north of Milan, in the provinces of Milano, Varese, Como, Novara and Brescia. Around 800 trains per day circulate in the network. FerrovieNord also takes care of the ordinary and extraordinary maintenance of the network, of its adjustment, of the assistance for improvement actions and of the activation of new stations. FerrovieNord has developed a railway simulation model based on OpenTrack®, currently used to represent the network exploitation conditions, to evaluate the impact of infrastructural modifications and to predict the behaviour of new rolling stock.

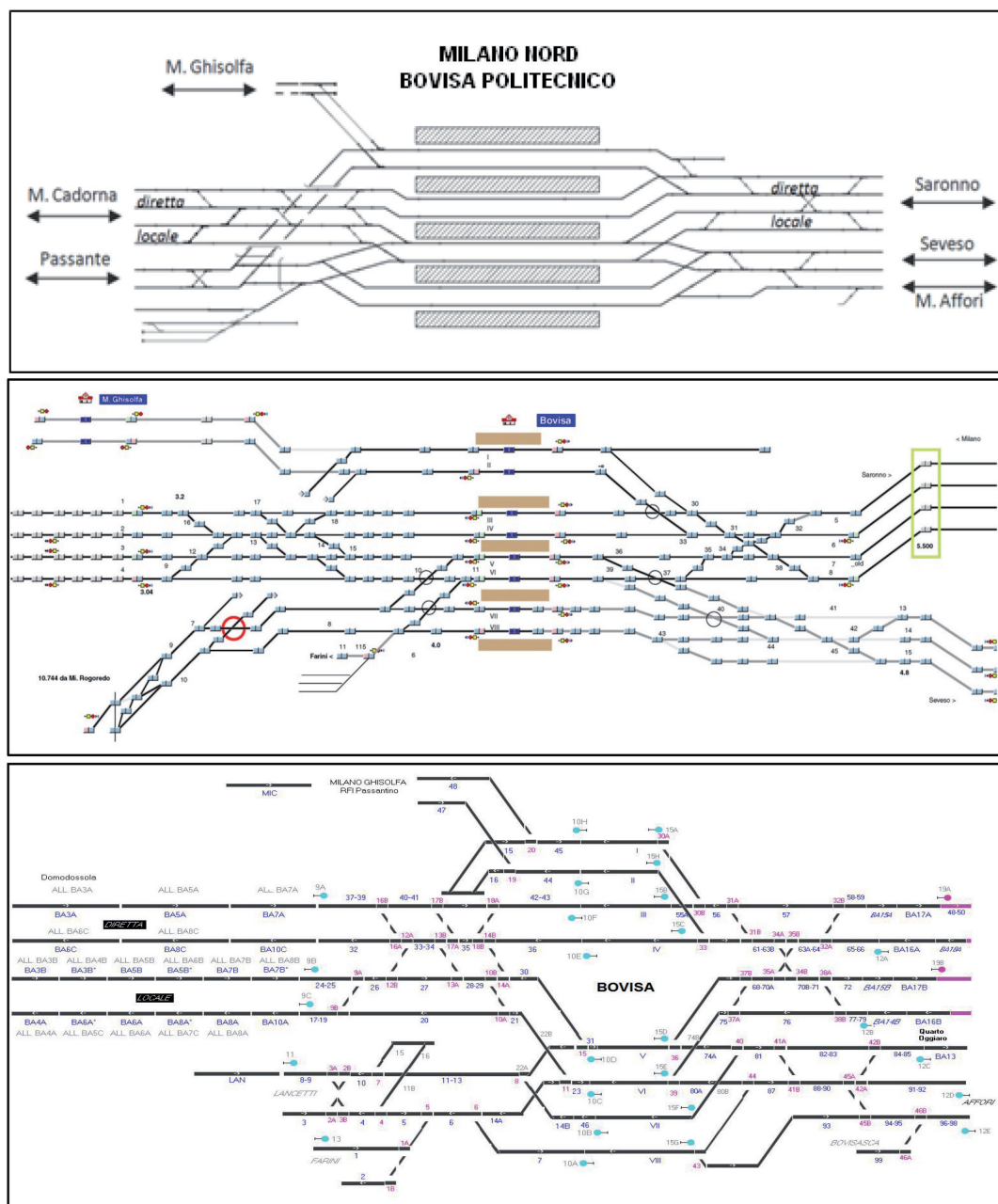


Fig. 2 - Layout della stazione di Milano Nord Bovisa Politecnico desunta dall'orario di servizio (in alto), nella rappresentazione impiegata nel modello OpenTrack (al centro) e nella schermata del sistema SCCT (in basso).
 Fig. 2 - Layout of Milano Politecnico Bovisa station as per internal FerrovieNord timetable (high); layout designed on OpenTrack© simulator (centre) and in the SCCT system screen (below).

- valutazioni sulla puntualità dei treni a seguito di interventi all'infrastruttura di carattere manutentivo (intervalli di manutenzione programmata, interruzioni di binario o di circolazione, etc.) o di nuova costruzione (di carattere impiantistico, di tracciato, eliminazione o introduzione di località di servizio, potenziamento infrastrutturale, etc.);
- valutazioni sulla puntualità dei treni in esercizio a seguito di modifiche legate all'offerta dei servizi (aggiunta di nuovi servizi, modifica dei servizi esistenti, etc.);
- studi di regolarità in previsione dell'attivazione di nuove linee non ancora in esercizio.

L'intera rete FerrovieNord è stata implementata nel software di simulazione secondo tutte le caratteristiche di modellizzazione richieste dal programma OpenTrack®: dati plano-altimetrici, posizione dei segnali e logica di funzionamento secondo [9] e [10], topologia dei piazzali delle stazioni. Il modello è aggiornato costantemente ad ogni variazione infrastrutturale approvata con ordine di servizio, mentre all'occorrenza, in funzione della simulazione da eseguire, per i dati relativi all'orario (orario di arrivo, partenza e sosta) e al materiale rotabile (caratteristiche meccaniche, caratteristiche elettriche, tipologia del materiale, performance del mezzo di trazione).

Per l'analisi in oggetto è stata creata, da NET Engineering⁽⁴⁾, un'apposita sottorete costituita dal nodo di Bovisa e dalle stazioni ad essa limitrofe lungo ogni linea, con l'eccezione del tratto Bovisa-Domodossola-Milano Cadorna rappresentato nella sua completezza.

5. I dati sulla puntualità a disposizione di FerrovieNord

Per costruire una base dati sulla puntualità dei treni, si sono osservati i dati storici di circolazione, riferiti a ogni giorno del mese di febbraio 2011.

Le informazioni sono costituite dagli orari reali di tutti i treni in arrivo ed in partenza dalla stazione di Bovisa, così da poter valutare gli scostamenti rispetto all'orario pianificato.

Il periodo in esame, pur essendo il mese più breve dell'anno e pur trovandosi in un periodo invernale, dove maggiori possono essere le perturbazioni legate a condizioni meteorologiche avverse, è stato comunque ritenuto significativo per lo scopo del lavoro. Con i dati di puntua-

⁽⁴⁾ NET Engineering SpA è una società di ingegneria civile attiva da oltre trent'anni nel campo della progettazione di infrastrutture di trasporto e della pianificazione dei sistemi di trasporto. In particolare, in campo ferroviario, NET Engineering si occupa, tra l'altro, di pianificazione e progettazione dei servizi ferroviari, valutazione degli impatti e verifica della fattibilità dell'orario. In questo ambito ha sviluppato la versione italiana del software OpenTrack®.

TABELLA 1 - TABLE 1

TRANSITI NEL GIORNO FERIALE TRAIN PASSAGES IN A WORKING DAY

| Tratta Itinerary | N° treni N° trains |
|-----------------------------------|--|
| Milano Cadorna - Bovisa - Saronno | 448 |
| Milano Cadorna - Bovisa - Seveso | 147 (linea diretta) 147 (direct link) |
| Bovisa - P. M. Ghisolfi (RFI) | 55 |
| Bovisa - Passante (RFI) | 193 |

- *evaluations on train punctuality when performing maintenance activities (scheduled maintenances, temporary unavailability of tracks or circulation limitations) or new implementations (new station layouts, opening or closing of trains station or train halts, infrastructural improvements);*
- *punctuality evaluations after services modifications (new services, modification of existing services);*
- *regularity studies for lines that are about to be opened to traffic but which are not active yet.*

The complete FerrovieNord network has been implemented in the railway simulator, coding all the information required by the software: plan and elevation data, signal position and relevant logic according to [9] and [10], station tracks layouts. The model is constantly updated and is modified when an official service order approves an infrastructural modification; other modifications are implemented according to the desired simulation both for timetable data (arrival, station stop, departure) and rolling stock (mechanical and electrical features, type of rolling stocks, engine performances).

For the analysis described in this paper NET Engineering S.p.A.⁽⁴⁾ implemented a sub-network around Milano Nord Bovisa Politecnico station, including adjacent stations in each line with the exception of Bovisa – Domodossola – Milano Cadorna line which was entirely taken in consideration.

5. Punctuality data availability for FerrovieNord network

In order to create a punctuality database, all trains movements were collected for each day of February 2011. Actual and planned timetables of all trains entering and

⁽⁴⁾ NET Engineering S.p.A. is an engineering firm that has been active for more than 30 years in the field of transport infrastructure projects and transport systems planning. In particular, in the railways domain, NET Engineering projects and plans railway services, performs impact evaluations and verifies timetables feasibility. In this framework, NET Engineering S.p.A. has also developed the Italian version of OpenTrack® software.

lità rilevati, infatti, non si mirava a sviluppare un modello predittivo, che a partire dalla base dati raccolta permettesse cioè di fornire indicazioni sul comportamento futuro del traffico nella rete.

Al contrario, si voleva identificare e testare una metodologia per rappresentare i diversi scostamenti temporali individuati. Come si vedrà oltre, i treni rilevati nel mese sono stati aggregati per linea, per fascia oraria e per varie classi di ritardo (puntuali, entro il minuto, 1-2 minuti, ecc.), al fine di determinare la probabilità che in una data fascia oraria, un treno percorrente una specifica linea fosse da associare ad una definita classe di puntualità. Avendo preso in considerazione sei linee per dieci fasce orarie, le 60 aggregazioni ottenute sui 21 giorni feriali di osservazione hanno permesso di coprire molte differenti situazioni: linee a scarso traffico, linee congestionate, ore di punta, ore di morbida, situazioni di elevata puntualità, situazioni di congestione, ritardi sistematici (si vedano alcuni esempi al successivo par. 5) e di verificarne una per una la rispondenza al simulatore (confronti al par. 7). L'analisi di differenti periodi di osservazione potrà permettere di raccogliere nuove e diverse distribuzioni di puntualità per linea e fascia oraria e, attraverso l'approccio metodologico proposto, sarà possibile riprodurre in simulazione anche tali situazioni analogamente a quanto esposto nel presente lavoro per il set di dati analizzati.

I dati per la ricerca sono stati ottenuti attraverso il *Sistema di Controllo della Circolazione Treni (SCCT)*, un sistema software che, interfacciandosi tramite la rete dati con gli apparati di segnalamento, effettua il tracciamento (rappresentazione grafica) della marcia reale dei treni sulla rete sociale e, sulla base dell'orario di servizio in vigore, ne calcola il ritardo in modo dinamico e oggettivo. Il sistema, inoltre, fornisce informazioni sui segnali di prima categoria, gli itinerari, i circuiti di binario, le sezioni di blocco, i passaggi a livello ed è in grado di trasferire le informazioni a sistemi esterni, ad esempio per il pilotaggio dei cartelli indicatori e per l'inoltro degli annunci sonori automatici presso gli impianti.

Il sistema SCCT è stato interrogato affinché producesse stringhe di dati (di cui si riporta un esempio in tabella 2), che, per ciascun treno transitante per Milano Bovisa, contenessero le seguenti informazioni:

- data;
- linea di appartenenza del treno;
- orientamento del treno (pari: verso Milano Cadorna; dispari: da Milano Cadorna);
- fascia oraria;
- numero del treno;
- descrizione dell'impianto limitrofo rispetto all'impianto di Bovisa;
- ritardo in arrivo e in partenza da Bovisa e dalle stazioni adiacenti.

leaving Bovisa station were gathered into a database with the aim of calculating relevant differences.

The examined period, although referred to the shortest month of the year and although being in winter season, when there is a higher probability of having unfavourable meteorological conditions, was nevertheless considered significant. Data collection, in fact, was not oriented to the creation of a predictive model, which would have used the existing database to estimate the future conditions of the network. On the contrary, the aim of the project was the implementation and the verification of a methodology allowing representing all surveyed differences between planned and actual timetables.

As explained further on, all trains were grouped per line, time slot and class of delay (punctual, within 1 minute, 1-2 minutes, etc), in order to determine the probability that, in a specific time slot, a train running on a specific line could be associated to a specific class of delay. Having taken in consideration six lines and ten time slots, the sixty aggregations repeated for the 21 working days allowed to cover many different situations: lines with few traffic, congested lines, peak hours, off-peak hours, high-punctuality situations, systematic delays (some examples are shown in the following chapter 5). All these different situations were studied, represented in the simulation model and reproduced correctly (comparisons are described in chapter 7).

New punctuality surveys may generate different distributions per line and time slot: throughout the proposed methodological approach it will be possible to reproduce in the simulation tool even these new situations, as it has been done with the collected data.

Survey data were collected through the Control System for Trains Circulation (Sistema di Controllo della Circolazione dei Treni, SCCT), a software system which is interfaced with railway signal system and which produces the graphical tracing of all the train movements in the FerrovieNord network. According to the loaded timetable, the system can also calculate the difference between the planned timetable and the actual position of trains. Moreover, the system can produce charts and tables describing signal states, itineraries, state of track circuits, rail road crossings. Software interfaces allow the system to transmit data to other systems, for instance station panels indicating departing and arriving trains, or the automatic system for the announcements in the stations.

SCCT was queried in order to produce, for each train passing through Milano Bovisa Station, a data string (an example in table 2) containing:

- date;
- line used by the train;
- train direction (from/to Milano Cadorna terminus);
- time slot;
- number of the train;
- description of the previous station before Milano Bovisa;
- arrival and departure delay in Milano Bovisa and in the previous station.

ESEMPIO DEI DATI ESTRATTI DAL SISTEMA SCCT
 EXAMPLE OF DATA PRODUCED BY SCCT SYSTEM

Linea DIRETTA

| Data | Linea | Orientamento Linea | Fascia Orario | Treno | Desc FNME Impianti Fermate | Min Rit Arr Storico | Min Rit Par Storico |
|------------|--------|-----------------------|---------------|-------|-------------------------------|------------------------|------------------------|
| 01/02/2011 | BA-MXP | P | 13 | 10346 | M.N. Quarto Oggiaro | 0 | 1 |
| 01/02/2011 | BA-MXP | P | 14 | 10348 | M.N. Quarto Oggiaro | 0 | 1 |
| 01/02/2011 | BA-MXP | P | 14 | 10350 | M.N. Quarto Oggiaro | 0 | 0 |
| 01/02/2011 | BA-MXP | P | 15 | 10352 | M.N. Quarto Oggiaro | 2 | 4 |
| 01/02/2011 | BA-MXP | P | 15 | 10354 | M.N. Quarto Oggiaro | 0 | 0 |
| 01/02/2011 | BA-MXP | P | 16 | 10356 | M.N. Quarto Oggiaro | 9 | 10 |
| 01/02/2011 | BA-MXP | P | 16 | 10358 | M.N. Quarto Oggiaro | 0 | 1 |
| 01/02/2011 | BA-MXP | P | 17 | 10360 | M.N. Quarto Oggiaro | 2 | 3 |
| 01/02/2011 | BA-MXP | P | 18 | 10366 | M.N. Quarto Oggiaro | 6 | 6 |
| 01/02/2011 | BA-MXP | P | 19 | 10370 | M.N. Quarto Oggiaro | 2 | 4 |
| 01/02/2011 | BA-MXP | P | 19 | 18372 | M.N. Quarto Oggiaro | 1 | 2 |
| 01/02/2011 | BA-MXP | P | 20 | 10376 | M.N. Quarto Oggiaro | 2 | 4 |
| 01/02/2011 | BA-MXP | P | 21 | 10380 | M.N. Quarto Oggiaro | 7 | 7 |
| 01/02/2011 | BA-MXP | P | 22 | 10384 | M.N. Quarto Oggiaro | 0 | 0 |
| 01/02/2011 | BA-MXP | P | 23 | 10388 | M.N. Quarto Oggiaro | 4 | 4 |
| 01/02/2011 | MI-CO | D | 7 | 1111 | Milano Nord Domodossola | 0 | 0 |
| 01/02/2011 | MI-CO | D | 7 | 1111 | M.N. Quarto Oggiaro | 0 | 0 |

Nella fase di raccolta dei dati è stata operata una prima scrematura, con lo scopo di distinguere lievi scostamenti fisiologici dai ritardi gravi dovuti a guasti o incidenti. Nello specifico si è deciso di limitare a 10 minuti il ritardo massimo preso in considerazione. Un ritardo superiore, infatti, è da ritenersi imputabile ad una circostanza eccezionale e non rientra nella normale variabilità del comportamento della rete che vuole essere l'oggetto d'indagine del presente studio.

Per poter costruire le distribuzioni delle classi di ritardo in arrivo nell'impianto di Bovisa, è stato necessario raggruppare la mole dei dati a disposizione in alcuni specifici insiemi. Le aggregazioni sono state svolte per:

- linea;
- fascia oraria;
- direzione di marcia del treno.

6. I dati stocastici in OpenTrack®: le distribuzioni

OpenTrack® permette di lavorare con parametri stocastici grazie ad appositi insiemi di dati definiti "distribuzioni". Una distribuzione è una rappresentazione di un parametro variabile basata sulla definizione d'intervalli e sulla specificazione della probabilità che il valore del parametro cada all'interno di ognuno degli intervalli. Le caratteristiche della distribuzione si descrivono mediante una tabella: in tabella 3 è riportato un esempio.

Still in the data collection phase, a first filter was applied on data, in order to recognise immediately the important delays which could be not included in the "normal variability" of railway traffic but which were originated by important incidents or faults. It was decided to limit to ten minutes the maximum delay to be considered in the framework of the present study. A delay of more than ten minutes, in fact, has to be explained with an exceptional event affecting the line or the train and cannot be included in a study of the statistical variability of the traffic network.

In order to determine the delay classes it has been necessary to aggregate the data according to:

- lines;
- time slots;
- train direction.

6. Statistic data in OpenTrack®: distributions

OpenTrack® allows to work with stochastic parameters throughout specific datasets named "distributions". A distribution is a representation of a variable parameter that relies on the definition of intervals and on the declaration of the probability that the parameter value is included in each of the intervals. Distributions are described through a table, such as the example in table 3. In each row of the table, the first two values are the extremes of an interval, whereas the third value is the probability for the parameter value to be included in relevant interval.

In ogni riga della tabella i primi due valori sono gli estremi di un intervallo, mentre il terzo è la probabilità che il parametro ricada all'interno dell'intervallo.

La regola di compilazione della distribuzione prevede che la somma dei valori inseriti nella terza colonna chioda al 100%.

La metodologia è stata condizionata ovviamente dalle possibilità offerte dal programma di simulazione, la cui versione in uso al momento permetteva l'implementazione di classi di eventi e della probabilità che il valore stocastico ricadesse in tale classe. Le funzioni di probabilità sono quindi discrete e non continue: è possibile definire intervalli piccoli a piacere, ma la probabilità che il valore stocastico ricada nell'intervallo è costante. Siccome l'obiettivo della ricerca prevedeva prima l'osservazione di una situazione reale e quindi la verifica della bontà della sua rappresentazione, le caratteristiche di questa specifica funzione del simulatore erano compatibili con la tipologia di dati raccolti e si confacevano quindi allo scopo della ricerca.

Le distribuzioni possono essere usate per tutti i parametri variabili come la durata di un inconveniente casuale, l'extra-tempo d'arresto in stazione o il ritardo in partenza di una corsa. Quando, durante la simulazione, il programma si trova ad utilizzare la grandezza associata alla distribuzione, al posto di attribuire un valore fisso, genera un valore casuale (uno ed uno solo) in funzione delle specifiche della distribuzione. Nella simulazione successiva sarà quindi generato un altro valore casuale e così via. Dopo decine o centinaia di simulazioni, è possibile verificare come i diversi valori casuali associati al parametro rispecchino le specifiche impostate nella distribuzione implementata.

In tabella 4 si riporta un esempio della metodologia di aggregazione dei dati di puntualità secondo le specifiche esposte al paragrafo precedente.

In funzione del numero di treni risultante dall'aggregazione sopra riportata, è stata costruita una distribuzione di entità di ritardo e di probabilità che questo si verifichi per ciascuna linea e ciascuna fascia oraria.

In fig. 3 si riportano alcuni grafici di esempio che mostrano diverse distribuzioni ricavate. Si vede per esempio da sinistra verso destra una linea con treni puntuali, una linea con prevalenza di arrivi con lieve ritardo, ed infine una linea in cui gli scostamenti rispetto all'orario assumono valori maggiori.

Si noti che la linea che presenta maggiore puntualità è quella da cui provengono treni partiti da una stazione di testa (Cadorna) due fermate prima, mentre per le altre linee i treni sono alla fine dell'itinerario e quindi più facilmente hanno accumulato perturbazioni nella marcia.

TABELLA 3 - TABLE 3

ESEMPIO DI DISTRIBUZIONE
EXAMPLE OF A DISTRIBUTION

| Da / From (s) | A / To (s) | (%) |
|---------------|------------|-----|
| 0.0 | 0.0 | 33 |
| 0.0 | 60.0 | 52 |
| 60.0 | 120.0 | 15 |

The rule for compiling a distribution chart is to have the sum of all the values in the third column equal to 100%.

The methodology has been obviously conditioned by the possibilities offered by the simulation program. The available software version at the moment of the study allowed the implementation of discrete probability functions: interval may be as small as required, but the probability that the stochastic value is inside the interval is constant. Since the study was organised with the observation of a real situation and the verification of the quality of its representation in a simulation tool, the characteristics of this specific function of the simulation tool were compatible with the typology of collected data and were therefore adequate to the scope of the research.

Distributions can be used for all the variable parameters such as the duration of an incident, the additional stop time at a station, the delay at departure of a train. When, during the simulation, the software bases its calculations on a parameter that is described through a distribution, instead of using a specific predetermined input data, it randomly generates a value according to the distribution specifications. In the following simulation run a different random value will be generated, and so on. After dozens or hundreds of simulation, the analysis of the results should allow verifying that variability of the chosen values respects the distribution specifications.

In table 4 there is an example of the aggregation methodology applied to collected data, according to the description given at the previous paragraph.

TABELLA 4 - TABLE 4

ESEMPIO DI AGGREGAZIONE DEI DATI
EXAMPLE OF DATA AGGREGATION

| Linea Line | Fascia oraria Time slot | Numero treni per entità del ritardo Number of trains per delay class | | | | | |
|--------------------|-------------------------------|---|---------|---------|---------|---------|----------|
| | | 0 | 0-1 min | 1-2 min | 2-5 min | 6-8 min | 8-10 min |
| Saronno diretta | 05-06 | 2 | 3 | 5 | 3 | 2 | 0 |
| | 06-07 | 4 | 6 | 4 | ... | ... | ... |
| | 07-08 | 3 | 7 | ... | ... | ... | ... |
| | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| Seveso | 05-06 | 1 | 4 | ... | ... | ... | ... |
| | 06-07 | 5 | ... | ... | ... | ... | ... |
| | 07-08 | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |

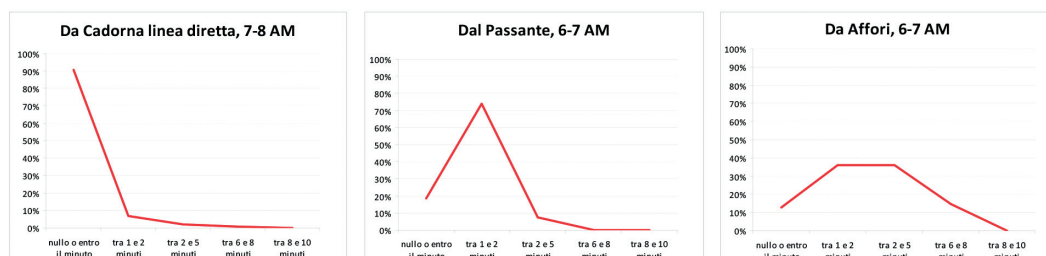


Fig. 3 - Esempi di diverse distribuzioni di puntualità rilevate.
 Fig. 3 - Example of different punctuality distribution emerged from the data collection.

7. L'applicazione dei dati di puntualità alle corse

Occorre ricordare che la simulazione stocastica è un passo successivo rispetto alla simulazione deterministica: questo significa che l'applicazione degli scostamenti deve avvenire su uno scenario già calibrato, i cui risultati cioè ribattono con la precisione desiderata gli indicatori descrittivi del caso reale indisturbato. La simulazione deterministica a volte già evidenzia alcuni scostamenti delle corse rispetto all'orario previsto: ciò significa che, anche in assenza di distribuzioni di ritardo, lo scenario deterministico non è da considerarsi indisturbato⁽⁵⁾.

OpenTrack©, una volta disegnata la rete, permette di generare un treno in un punto specifico, per poi farlo viaggiare lungo la topologia secondo l'itinerario prestabilito. La "comparsa dal nulla" di un treno nella rete permette di sottintendere una serie di operazioni (uscita dalla rimessa, posizionamento al binario, ...) la cui rappresentazione può essere superflua ai fini della modellizzazione della rete, anche se il modello è in grado di rappresentare tali manovre quando necessario.

Così strutturato, il modello avrebbe permesso di far comparire i treni a Bovisa secondo il ritardo desiderato, in quanto anche l'orario di generazione di una corsa è rappresentabile mediante una distribuzione stocastica. In questo modo però, non si sarebbe avuta una rappresentazione adeguata: un treno in ritardo non soltanto si trova alla stazione dopo l'orario previsto, ma anche altera la disponibilità della linea a monte della stazione. Se il treno com-

According to the number of trains for each class, it has been possible to create a distribution of delay value and of delay probability for each line and each time slot.

Figure 3 shows some graphs with examples of different distributions. On the left there is a line with punctual trains (from Cadorna, direct line), on the centre a line where the greatest part of arriving trains presents a slight delay (from Passante) and on the right there is a line where trains have more important delays (from Affori).

The most punctual line is "from Cadorna", as trains depart from Cadorna terminus stations and have only an intermediate stop before entering Bovisa. On the contrary, trains on the other lines are nearly at the end of their itinerary, so it is more probable for them to have cumulated delays during the route.

7. Applying punctuality data to courses

Above all, it is important to remind how a stochastic simulation must be a more precise step that comes after a deterministic simulation: this means that the application of statistical deviation needs a calibrated deterministic scenario as a starting point. Simulation must already be able to represent the undisturbed scenario which, despite the absence of perturbations, may not show anyway a perfect correspondence between planned timetable and real behaviour of trains⁽⁵⁾.

OpenTrack©, once designed the network, allows the generation of a train in a specific point of the network. This

⁽⁵⁾ Vi sono due ragioni principali per cui la simulazione deterministica può non rappresentare esattamente le previsioni dell'orario. La prima è da ricercarsi nell'orario stesso, che viene compilato utilizzando delle approssimazioni sulle performance dei treni, sugli intertempi, sulla velocità media e, in generale, contiene dilatazioni tali da concedere la possibilità di recuperare alcuni lievi ritardi. La seconda ragione risiede poi nella precisione del modello in quanto ogni implementazione è frutto di compromessi e di semplificazioni. Un esempio: nella rete reale i cambi di pendenza non sono improvvisi ma presentano una zona di transizione; al contrario nel simulatore la pendenza è rappresentata da un valore discreto ed è necessario inserire il punto specifico in cui avviene la variazione.

⁽⁵⁾ There are two main reasons for which the deterministic simulation may not reproduce exactly the planned timetable. The first is that the timetable itself is compiled through approximation of rolling stock performance, travel times, average speeds and, in general, it is structured in order to allow some minor delays to be recovered. The second reason is that a model is an approximation of the real situation. For instance, slope changes happen gradually, whereas in the model slope is defined through a discrete value and it is necessary to declare a specific point in the network in which the variation is located.

parisse direttamente in stazione, la rappresentazione modellistica non terrebbe conto delle perturbazioni a monte e delle eventuali ripercussioni sulle corse consecutive.

Si è quindi privilegiata una modalità di rappresentazione che prevede la creazione dei treni nella rete a monte di Bovisa, per poi rappresentarne l'arrivo alla stazione secondo i ritardi voluti. OpenTrack®, però, non permette di imporre un ritardo specifico in una stazione: una volta che un treno è generato nella rete all'orario desiderato, questo prosegue il suo viaggio secondo le caratteristiche planoaltimetriche, le proprie prestazioni e le prescrizioni del segnalamento: l'orario di arrivo alle località di servizio successive è quindi una variabile non controllabile.

Allo stesso modo non sarebbe stato possibile imporre il ritardo nella stazione a monte di Bovisa poiché nel percorso tra due stazioni consecutive l'orario potrebbe permettere un recupero, falsando quindi i dati imposti.

Per rappresentare in maniera adeguata nella sottorete in esame il ritardo in arrivo a Bovisa, i treni sono stati generati puntuali nelle stazioni a monte di Bovisa, quindi ne è stata rappresentata la marcia regolare fino a Bovisa ed il ritardo desiderato è stato imposto all'ingresso della stazione mediante una "ritardata apertura del segnale", ovvero, nella terminologia di OpenTrack®, un "guasto al segnale".

Il "guasto al segnale" è un fenomeno che si può applicare a tutti i treni in ingresso alla stazione; la breve distanza tra il segnale d'ingresso e l'asse fabbricato viaggiatori (progressiva in corrispondenza della quale sono calcolati i ritardi da sistema SCCT) non permette al treno di recuperare. Il "guasto al segnale" ha una durata controllabile mediante distribuzione e pertanto si è rivelato la soluzione idonea per il caso in esame.

La rappresentazione di questo inconveniente ha richiesto l'intervento degli sviluppatori del software, che hanno implementato appositamente una specifica modifica del "guasto al segnale" presente nel simulatore affinché rispondesse completamente alle necessità della rappresentazione. L'implementazione dei valori ricavati da Ferrovie Nord non è stata però automaticamente inserita nella durata del guasto perché l'imposizione di uno stop al segnale comporta tre diversi perditempo: il perditempo per decelerare in corrispondenza del segnale (t_d), l'attesa vera e propria corrispondente al valore dichiarato in distribuzione ed il perditempo per riaccelerare ed entrare a Bovisa (t_a) (fig. 4).

Nella successiva tabella 5 si riportano un insieme di dati di esempio riferiti ad una linea in una specifica direzione per una determinata fascia oraria. Nelle colonne di sinistra sono riportati i dati ricavati dal sistema SCCT, mentre a destra sono riportati i valori effettivamente implementati nel simulatore per i segnali di ingresso a Bovisa.

Si noti che la probabilità che i treni siano puntuali non si traduce in probabilità di guasto di durata nulla (ci sarebbero comunque i tempi di decelerazione ed accelerazione), ma in probabilità che non avvenga il guasto. Questo valore, impostato a titolo di esempio pari a 30%

train will then travel in the topology according to a specific itinerary. A train "appearing from nowhere" somewhere in the network represents a series of operations (exit from the garage, shunting from the yard to the station track, ...) for which the representation is unnecessary when modelling the network, even if the model may represent this operations if specifically needed.

With these premises, the model could have been implemented imposing the trains to "appear from nowhere" in Bovisa station with the requested delay, since the generation of a specific train can be implemented with a delay according to a distribution. In this way, nevertheless, the representation would not have been as complete as needed. A delayed train, in fact, does not only affect the availability of the station tracks, but creates problems also on the line. Should the delayed train had appeared in the station, the model would have not described the effects in the up streaming line and the consequences on the following courses.

Another representation was then chosen: trains were created in the network before Bovisa station, in order to be delayed accordingly to the distributions before they could reach Bovisa. The problem was then the application of the delay: OpenTrack® does not allow to declare as an input data a specific delay in a station: once a train is generated, it then moves in the network according to performance, circulation rules and the physical characteristics of the network. The arrival time at a specific station, although being declared as planned timetable, is a variable that is not necessarily respected by marching trains.

In the same way, it is not possible to impose the delay at the previous station, where the train is generated. Between two stations, in fact, the timetable should always allow to recover a little delay: the delay in Bovisa would not then be equal to the delay imposed one station (or more) before Bovisa.

To represent in a satisfying way the delays in the subnetwork, all trains were punctually generated before Bovisa (i.e. according to timetable) and were then delayed before entering the station with a "delayed entrance clearance" in the station, or "incident at signal" according to OpenTrack vocabulary.

An "incident at signal" can be applied to all trains entering a station and the short distance between the home signal and the actual station stop (in which SCCT system calculates the difference between actual and planned timetable) does not allow the train to recover the imposed delay. The "incident at signal", moreover, can have the duration time controlled throughout a distribution: it was then the correct solution for the model.

This representation, nevertheless, needed the software developers to fix some minor aspects, in order for the "incident at signal" characteristics to be exactly aligned to FerrovieNord needs.

The delays collected by FerrovieNord were not implemented as they were: imposing a stop at the entrance of the

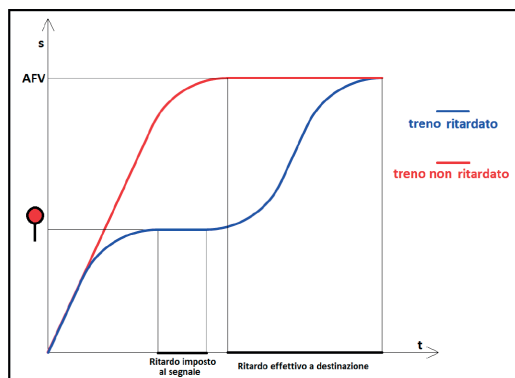


Fig. 4 - Confronto tra il diagramma orario di un treno che arriva in stazione indisturbato (linea rossa) ed uno che viene ritardato al segnale d'ingresso. Il ritardo effettivo imposto come arresto al segnale è inferiore al ritardo complessivo che il treno presenta all'arrivo in stazione.

Fig. 4 - Comparison between the train diagram representing a regular arrival at a station (red line) and the one representing a train delayed at station entrance (blue line). The waiting time imposed at the station entrance is smaller than the actual delay the train eventually shows when stopping at the station.

nella tabella, è stato applicato per ogni fascia oraria ed ogni linea in funzione dei dati rilevati. Le altre probabilità, che si riferiscono ai ritardi non nulli, pari al restante 70% nella tabella di esempio, sono state riproporzionate affinché la loro somma risulti pari al 100%. I tempi sono stati corretti con gli scostamenti sistematici r_s , i tempi di accelerazione t_a e decelerazione t_d ed è stato identificato un valore R_m (Ritardo minimo) tale da non rendere negativa l'espressione $(1 \pm r_s - t_a - t_d)$.

Si ritiene utile sottolineare che la scelta di utilizzare uno specifico controllo del segnale d'ingresso della stazione per rappresentare le perturbazioni è stata assunta in

station, in fact, implies three different delays: the delay caused by the deceleration at the signal stop (t_d), the real duration of the "signal incident" and the delay to re-start the train and to enter Bovisa station (t_a) (fig. 4)

In the following table 5 there is a set of data referred to a specific line in a specific direction in a specific time slot. In the left column there are SCCT values whereas on the right there are the values that were actually implemented at Bovisa home signal.

An important aspect to remember is that the probability of not having a delay is not represented by a zero seconds duration of the "incident" (deceleration and subsequent acceleration would take place anyway): it is the probability that the incident does not happen at all. This value, equal to 30% in the example table, was calculated for each line in each time slot according to the collected data. The other probabilities, used to describe delays greater than zero and equal to 70% in the same table, were re-proportioned in order for their sum to be equal to 100%. Times were then corrected with the systematic delays of the deterministic model (r_s), the acceleration and deceleration times (t_a and t_d) and also a minimum delay R_m was identified in order maintain a positive value for $(1 \pm r_s - t_a - t_d)$.

The choice of a specific control of the home signal to manage the train delays has been made according to the purpose of the study, which was not the investigation of the causes of the delays and not even the countermeasures to apply to prevent these delays. The purpose was to represent in a simulation model the same perturbations that were observed in the reality.

8. Model calibration

Model calibration is the process where model parameters are adjusted in such a way that the model is able to reproduce correctly the system behaviour.

TABELLA 5 - TABLE 5

TRATTAMENTO DEI DATI DEL RITARDO PER L'INSERIMENTO DEI VALORI NEL MODELLO
TREATMENT OF DELAY DATA FOR MODEL IMPLEMENTATION

| Elaborazione dei dati SCCT SCCT data processing | | | Valori implementati nel modello Values implemented on simulation model | | |
|--|------------|----------------------------|--|---------------------------|----------------------------|
| Ritardo Delay | | Probabilità Probability | Probabilità che non venga imposto guasto al segnale Probability that incident at signal does not happen | | 30% |
| da / from (s) | a / to (s) | | da / from (s) | a / to (s) | Probabilità Probability |
| 0 | 0 | 30% | — | — | — |
| 1 | 60 | 25% | $R_m \pm r_s - t_a - t_d$ | $60 \pm r_s - t_a - t_d$ | 35,8% |
| 61 | 120 | 20% | $61 \pm r_s - t_a - t_d$ | $120 \pm r_s - t_a - t_d$ | 28,6% |
| 121 | 300 | 15% | $121 \pm r_s - t_a - t_d$ | $300 \pm r_s - t_a - t_d$ | 21,4% |
| 301 | 480 | 5% | $301 \pm r_s - t_a - t_d$ | $480 \pm r_s - t_a - t_d$ | 7,1% |
| 481 | 600 | 5% | $481 \pm r_s - t_a - t_d$ | $600 \pm r_s - t_a - t_d$ | 7,1% |

stretta relazione con gli scopi dello studio. Come già accennato in precedenza, infatti, l'obiettivo perseguito attraverso questo lavoro non era quello di individuare le cause che avevano generato i ritardi, né tanto meno definire delle contromisure da mettere in atto per risolverli o abbatterli; bensì quello di verificare se fosse possibile riprodurre, in un modello di simulazione, una situazione con le medesime caratteristiche di perturbazione rilevate nel caso reale.

8. La calibrazione del modello

La calibrazione del modello è il processo con cui si adeguano i parametri di base al fine di verificare che la simulazione riesca a riprodurre correttamente il funzionamento del sistema.

I dati di input sono stati la topologia della rete, le caratteristiche dei rotabili, il segnalamento, le regole di circolazione, gli orari invariati e le distribuzioni di ritardo in ingresso a Bovisa. Una volta fissati questi parametri, i treni sono stati lasciati liberi di circolare nella rete secondo gli itinerari prestabiliti e le regole di circolazione in vigore, senza ulteriori forzature (tranne, ovviamente, il ritardo imposto al segnale d'ingresso a Bovisa).

I risultati delle diverse ripetizioni della simulazione di OpenTrack© sono stati aggregati per fascia oraria, linea e classe di ritardo in arrivo e in partenza in ogni stazione.

Si sono quindi confrontate le distribuzioni di ritardi in arrivo ed in partenza a/da Bovisa rilevate nella situazione reale e le distribuzioni ottenute mediante l'aggregazione dei risultati del simulatore. In particolare:

- la verifica della corrispondenza tra i ritardi rilevati in ingresso alla stazione e quelli desunti dal simulatore ha permesso di validare la metodologia con cui le quantità r_s , t_a e t_d sono state calcolate e implementate nel modello;
- la corrispondenza tra i ritardi rilevati in partenza da Bovisa e quelli ottenuti dal simulatore è indice di bontà della rappresentazione e della corretta calibrazione del modello. Il ritardo in partenza da Bovisa, infatti, non è semplicemente pari al ritardo in arrivo più il tempo di sosta: l'interazione di una corsa in arrivo con le altre corse in arrivo o in partenza puntuali o in ritardo può comportare un'ulteriore dilatazione dei tempi. Questo fenomeno si verifica anche con il confronto in tabella 2 dei dati di ritardo in partenza ed in arrivo. Per i dati di puntualità in partenza non si è inserito alcun parametro nel modello, ma si è lasciato che i treni circolassero liberamente nella rete secondo la planoaltimetria, le caratteristiche della trazione e le regole del segnalamento. La corretta corrispondenza dei valori indica la corretta implementazione del sistema rete-rotabili-esercizio e pertanto è indice della corretta calibrazione del sistema.

Nei grafici (figg. 5 e 6) sono messi a confronto i dati sulla puntualità raccolti e le relative uscite del simulatore che ne ha rappresentato la loro implementazione.

Si consideri che:

- i casi reali sono stati raccolti nell'arco di un mese, quin-

Input data are network topology, rolling stock performances, signalling, circulation rules, planned timetables and delay distribution in arrival at Bovisa. Once these parameters are implemented in the simulation tool, all trains in the simulated network are free to circulate according to their itineraries and their circulation rules, without any other external constraint except for the imposed delay when entering Bovisa station.

The results of different OpenTrack© simulation runs were aggregated according to time slots, line and delay class both for arrival and departure in each station. There was then a comparison between the delay distribution in arrival and in the departure to/from Bovisa in the real survey and in the simulation output.

The correspondence between real delays collected by SC-CT and simulated delays for trains arriving to Bovisa allowed to validate the methodology used to calculate r_s , t_a and t_d and to implement these quantities in the model, whereas the correspondence between the delays of trains departing from Bovisa in the survey and the same delays collected from the simulation output demonstrates that the model has been correctly calibrated. The delay in departing from Bovisa, in fact, is not just the delay in arrival plus a fixed stop time: every train entering the station interacts with other arriving or departing train, which may be punctual or delayed, and this may lead to further delays. This phenomenon (delay in departure equal or greater than delay in arrival) can also be recognised in table 2, where these delays are compared.

No input value was entered in the model to represent the delay at the departure from Bovisa: trains were free to move in the network according to their performances and to network characteristics and signalling.

Since modelled delays for departing trains match with the measured delays, it is possible to affirm that the system composed of network, rolling stock and rules appears to be correctly calibrated.

In the graphs of fig. 5 and fig. 6 there is a comparison of the measured and modelled punctuality.

It is necessary to consider that:

- *the survey lasted one month, so there were twenty working days for which punctuality data were collected. During these twenty days punctuality performances were calculated and aggregated per line, time slot as described before;*
- *the simulation tool allows a maximum of 200 simulations to be performed in a row, each time randomly generating non-deterministic values according to relevant distributions.*

In a first attempt, twenty runs of the model, each one generating different random values, should reproduce the average behaviour of the twenty days of survey; as the number of simulation runs increases, statistic averages should get even closer to the observed data. During this

di vi sono, per l'orario feriale, circa venti giorni di osservazioni. Durante questi venti giorni si sono verificate le performance di puntualità di tutti i treni nella rete, poi raggruppati per linee e per fasce orarie come in precedenza descritto;

- il programma di simulazione permette di effettuare fino ad un massimo di 200 simulazioni consecutive della rete, ciascuna volta generando casualmente in funzione delle distribuzioni i valori non deterministici.

In prima istanza, con una ventina di ripetizioni della simulazione, ognuna con una differente generazione di valori casuali, si dovrebbe poter già riconoscere il comportamento medio dei venti giorni rilevati; all'aumentare del numero di ripetizioni le medie statistiche delle simulazioni dovrebbero via via discostarsi sempre meno dall'andamento dei dati osservati. Durante la presente ricerca si è inizialmente lavorato con 200 simulazioni del programma e si sono poi eseguiti tentativi anche con 75 e 20. Si è visto che 75 simulazioni consecutive rappresentavano il corretto compromesso tra la complessità computazionale dell'operazione (tempi macchina e trattamento dati di output) e un sufficiente numero di generazioni casuali tali da permettere di riconoscere l'andamento delle distribuzioni per i valori non deterministici.

Per gli arrivi da Ghisolfia nella fascia oraria 6.00-7.00, il sistema SCCT ha rilevato che il 43% dei treni è sopraggiunto puntuale o entro il minuto mentre il simulatore ha restituito il 40% (-7%); i ritardi tra uno e due minuti sono stati invece maggiormente sottostimati (41% simulati contro 46% rilevati, -10,9%); la simulazione ha di conseguenza sovrastimato i ritardi tra due e cinque minuti (18% contro 11%). La sovrastima non ha comunque comportato che i treni fossero inclusi nelle fasce successive (5-8 minuti e 8-10 minuti), quando il sistema SCCT non ne aveva rilevati.

Nell'ambito della verifica della bontà della simulazione, per quanto riguarda le partenze per Novate, si è notato che talvolta le differenze tra SCCT e le simulazione sono maggiori, nonostante i grafici delle frequenze presentino andamenti paragonabili. Per esempio, nella fascia 7.00-8.00, la simulazione ha sovrastimato i treni con ritardo nullo o negativo (53% contro 38%), mentre sono stati sottostimati i treni con ritardi tra 5 e 8 minuti e tra 8 e 10 minuti (rispettivamente 10% e 2% nella realtà contro 0% nel modello). Nella fascia oraria successiva, al contrario, la sottostima coinvolge i treni puntuali e vi è un simile aumento dei treni con ritardi tra 5 e 10 minuti.

Queste discrepanze si spiegano con il fatto che sono diretti a Novate sia i treni provenienti dal Passante (linea

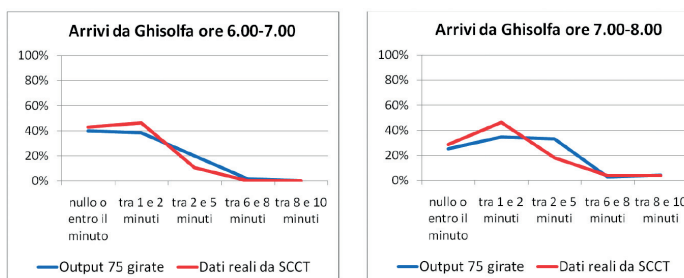


Fig. 5 - Confronto tra i ritardi in arrivo registrati dal SCCT e i valori prodotti dal simulatore.

Fig. 5 - Comparison between delays in arrival recorded by SCCT and collected from the simulation.

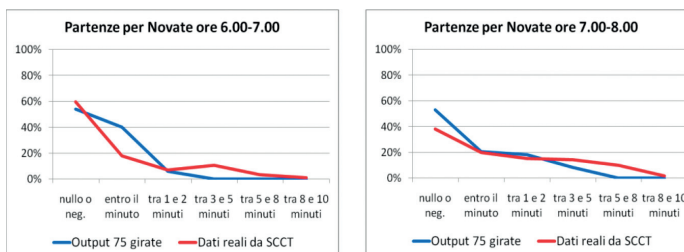


Fig. 6 - Confronto tra i ritardi in partenza registrati dal SCCT e quelli prodotti dal simulatore.

Fig. 6 - Comparison between delays in departure recorded by SCCT and collected from the simulation.

research there have been 200-run sessions, 75-run and 20-run. It was noticed that 75 runs represented the correct compromise between the computational complexity (calculation time and output data treatment) and an adequate number of random generation which allowed to recognise the distribution structure for non-deterministic values.

For trains arriving from Ghisolfia in 6.00-7.00 time slot, for instance, SCCT showed that 43% of the trains was punctual or had less than one minute of delay: the relevant simulation result was 40%. (-7%). Delays between one and two minutes showed a more important underestimation (41% against 46%, -10,9%) and, as a consequence, delays between two and five minutes were overestimated (18% against 11%). Despite the overestimation, no delay was included in the upper classes (5-8 minutes and 8-10 minutes) for which SCCT did not detect any train.

In the framework of the verification of punctuality distribution for departing trains, the analysis of departures towards Novate showed how differences between SCCT values and simulation results could be higher, although the graphs of delay class distribution shows a similar behaviour. For instance, in 7.00-8.00 time slot, the simulation has overestimated trains with delay equal

con traffico molto intenso e più facilmente soggetta a rallentamenti, inoltre questi treni hanno provenienze piuttosto distanti da Bovisa sia i treni originati da Cadorna (corse originate a breve distanza, senza rischio di accumulare ritardi significativi). I treni in partenza sono quindi una combinazione di treni in ingresso da diverse linee, a cui sono applicate diverse distribuzioni di ritardo in ingresso. E' opportuno ricordare che i ritardi in ingresso sono applicati per linea, indipendentemente dalla destinazione del treno.

Le differenze nei grafici sono attribuibili al fenomeno dell'accodamento di treni consecutivi nelle ore di punta. Nelle ore di morbida, infatti, la separazione temporale dei treni è in media maggiore e pertanto il ritardo al segnale imposto ad un treno risulta di norma inferiore al distanziamento. I treni, quindi, sorraggiungono al segnale d'ingresso e scontano la loro eventuale attesa quando il treno precedente ha già liberato la sezione di blocco e mentre il treno successivo deve ancora comparire. Nelle ore in cui il traffico è più intenso, al contrario, il ritardo imposto ad un treno può obbligare anche il successivo ad attendere accodato. Quest'ultimo, poi, una volta sorraggiunto in prossimità del segnale, scontrerà anch'esso gli effetti del guasto al segnale, con il risultato che il suo ritardo sarà pari al cumulo del proprio e di parte di quello del treno precedente.

9. Conclusioni: la simulazione stocastica del nodo di Bovisa

Il modello di simulazione approntato in questo studio ha permesso di rappresentare correttamente le perturbazioni del traffico nel nodo preso in esame; in particolare attraverso le attività svolte è stato possibile:

- verificare quale sia il funzionamento del simulatore nel momento in cui si applicano parametri stocastici;
- implementare una procedura che permette di riconoscere la variabilità del funzionamento della rete e ricostruire il medesimo comportamento nello strumento di simulazione;
- gettare le basi per una diversa metodologia di impiego del simulatore, le cui valutazioni non si limitano ad una verifica "statica" di implementazioni deterministiche nella rete, di modifiche dell'orario o di cambiamenti al materiale rotabile: alla verifica della fattibilità si può infatti sommare la verifica della stabilità dell'orario e della robustezza del programma di esercizio.

Una prima applicazione dello scenario così implementato è stata la costruzione di uno stress test per il nodo di Bovisa. Uno stress test è una verifica del funzionamento del sistema rete-esercizio di fronte a perturbazioni sempre più importanti dell'orario.

La metodologia proposta permette di verificare quali siano i limiti, per le diverse linee e nelle diverse fasce orarie, entro cui il ritardo di una corsa va ad influenzare negativamente le performance delle altre corse.

to 0 or less (53% against 38%), whereas trains with delays between 5 and 8 and 8 and 10 minutes were underestimated (10% and 2% respectively in SCCT data, 0% in the model). In the following time slot 8.00-9.00, on the contrary, the underestimation involves punctual trains and relevant overestimation is for trains with 5-10 minute delays.

These discrepancies can be explained with the consideration that trains heading to Novate come from two different origins: Passante (crowded line with intense traffic and more subject to delays, moreover trains itineraries are originated far upstream Bovisa) and Cadorna (nearby terminus station, with low probability for trains to show important delays). The studied trains, therefore, are the combination of trains entering Bovisa from different lines with two different distributions of entrance delay. It is important to consider that "incident at signals" are applied to trains entering - Bovisa from a specific line, regardless of the final destination.

The differences in the diagrams are caused, among other reasons, by consecutive trains queuing during peak hours. In off-peak hours, in fact, the time interval between two consecutive trains is normally longer than the imposed average delay: trains reach entrance signal and spend their imposed delay time once previous trains have already spent their delay at entrance signal and while consecutive trains haven't appeared yet. In peak hours, on the contrary, the delay imposed to a train may oblige also the consecutive train to wait in the upstream block section. Then, the consecutive train, after being delayed by the previous one, will have to undergo its own "incident at signal" with the result of being delayed twice.

9. Conclusion: the stochastic simulation of Bovisa node

The model showed that it is possible to represent correctly the traffic variability and relevant perturbations. In particular, this activity allowed to:

- *verify the response of the simulation tool when applying stochastic parameters,*
- *implement a procedure that allows to recognise the variability of the network behaviour and to reproduce the same in a simulation tool;*
- *to draw the guidelines for a new methodology of simulation application, in which evaluations are not "static" and limited to a deterministic implementation of the network, of the timetable or of the rolling stock: beyond the mere feasibility of a proposal, it is possible to verify timetable stability and the robustness of the exploitation model.*

One of the first application of this new methodology has been the implementation of a stress test for Bovisa hub. A stress test is the verification of network system behaviour as perturbations affecting punctuality increase.

Lo strumento non fornisce soltanto l'informazione relativa ai ritardi dei treni consecutivi: grazie alla simulazione del nodo è infatti possibile trarre conseguenze anche sulla propagazione delle perturbazioni nelle altre linee da e per Bovisa.

Al posto di limitarsi ad implementare dati di ritardo noti, infatti, si è preferito modificare artificialmente le distribuzioni al fine di testare, dato l'orario, l'infrastruttura, i rotabili e le regole, quali potevano essere le entità dei ritardi in grado di compromettere la stabilità del sistema. Per fare questo si è individuato una procedura costituita dalle seguenti operazioni:

- implementazione di una simulazione con applicazione delle distribuzioni di ritardo in tutte le direttrici tranne in una;
- applicazione alla direttrice in esame di una serie di distribuzioni di ritardo appositamente create, sempre più elevate rispetto ai ritardi medi riscontrati nelle varie fasce orarie;
- verifica dell'entità media dei ritardi per cui si compromette anche il regolare funzionamento delle altre direttrici;
- effettuazione del test per ognuna delle linee in ingresso alla stazione;
- identificazione dei valori limite del ritardo nelle varie linee.

In questo modo FerrovieNord ha a disposizione una serie di valori limite che permettono di distinguere una situazione risolvibile o una situazione destinata a perturbare il regolare esercizio. La metodologia ideata e le modalità di verifica applicate possono essere utilizzate anche in altri nodi della rete. Grazie agli approfondimenti sul fenomeno "guasto al segnale", infatti, è possibile studiare dal punto di vista stocastico ogni località di servizio, anche in assenza dell'applicazione di parametri stocastici nell'intera rete.

This methodology allows to verify which are, for different lines in different time slots, the delay maximum values for which a perturbation in a specific line impacts on the regularity of other lines as well. While a traditional model may calculate only the impact of delayed trains on upstream trains, in this case the network simulation allows to study the propagation of perturbations in other lines as well.

Instead of implementing the known delay distribution, the distributions were artificially modified in order to test which delays could compromise the system stability, given the timetable, the topology and the rolling stock characteristics.

To do that, a specific four-step procedure was implemented:

- *implementation of a simulation with application of delays distribution in all lines but one;*
- *application in the remaining line of a series of artificial delay distribution, expressly created with step-by-step greater values than the average recorded SCCT delays;*
- *repetition of the simulation for each line entering Bovisa hub;*
- *identification of the limit values for delays in each of the lines.*

In this way FerrovieNord obtained a series of limit values that represent for each line the delay threshold: below that value the perturbation is easily solved, above that value the perturbation spreads in the hub and in the other lines.

The methodology and the verification methods can be applied in other points of the network as well. The "incident at signal", in fact, allows to apply stochastic values in each railway facility without the need of applying stochastic values to the whole network.

BIBLIOGRAFIA - REFERENCES

- [1] A. NASH, D. HUERLIMANN – "Railroad simulation using OpenTrack®" presentato al "Comprail 2004 conference".
- [2] N. COLTRO, L. SACCO, B. DALLA CHIARA – "Calcolo della potenzialità e dei consumi energetici del collegamento ferroviario Torino - Modane: applicazione di modelli e simulazione", *Ingegneria Ferroviaria* 10-2011 pp. 831-858.
- [3] E. KONTAXI, S. RICCI – "Tecniche e metodologie per la determinazione della capacità ferroviaria: analisi comparata e prospettive d'integrazione", *Ingegneria Ferroviaria* 12-2009 pp. 1051-1080.
- [4] A. DICEMBRE, S. RICCI – "Railway traffic on high density urban corridors: Capacity, signalling and timetable", *Journal of Rail Transport Planning & Management* Vol. 1, Issue 2 December 2011 pp. 59-68.
- [5] White Paper (2001), "European transport policy for 2010: time to decide", European Commission COM 370.
- [6] Green Paper (1995), "The Citizens' Network. Fulfilling the potential of public passenger transport in Europe", European Commission COM (96) 601.
- [7] Green Paper (2007), "Towards a new culture for urban mobility", European Commission COM 551.
- [8] E. CASCETTA, A. CARTENI, A. CARBONE – "La progettazione Quality based nel trasporto pubblico locale. Il sistema di metropolitana regionale della Campania", *Ingegneria Ferroviaria* 3-2013, pp. 241-261.
- [9] FerrovieNord – "Regolamento Segnali" – Edizione 1981.
- [10] FerrovieNord – "Regolamento Circolazione Treni" – Edizione 1984 - Ristampa 2009.