



## La stima della propagazione dei ritardi: confronto tra metodologie analitiche e approcci simulativi nel caso di studio della linea “Direttissima” Roma-Firenze

### *Estimation of the propagation of delays: comparison between analytical methodologies and simulation approaches in the case study of the line “Direttissima” Rome-Florence*

Ing. Francesco Paolo PRENCIPE <sup>(\*)</sup>  
Prof. Ing. Marco PETRELLI <sup>(\*)</sup>

**Sommario** - Gli aspetti legati alla frequenza del servizio, al tempo di viaggio e alla puntualità assumono una rilevanza sempre maggiore per la soddisfazione dei passeggeri e per il livello di qualità attesa.

Il ritardo, infatti, è una delle maggiori questioni che i sistemi ferroviari di tutto il mondo si trovano ad affrontare attraverso analisi predittive e azioni mitigative. L'orario ferroviario necessita, quindi, del miglior *trade-off* fra gli elementi connessi alla capacità dell'infrastruttura, in termini di tracce allocabili, e alla regolarità del servizio.

Il presente lavoro approfondisce gli effetti della propagazione del ritardo in relazione ad un determinato valore del numero di treni circolanti nell'unità di tempo. L'ambiente di studio ha come riferimento la linea ad alta velocità “Direttissima” Roma-Firenze, asse portante della direttrice dorsale AV Torino-Milano-Napoli.

Si vuole, così, studiare la risposta del sistema ferroviario al variare del distanziamento tra i treni e in presenza di una fonte di ritardo. Il fenomeno viene descritto, nel seguito, dapprima dal punto di vista analitico sotto definite condizioni ideali e, successivamente, mediante il supporto del software di simulazione ferroviaria OpenTrack<sup>®</sup> considerando alcune configurazioni d'orario. Le varie metodologie utilizzate sono, infine, confrontate tra di loro.

Si potrebbero, pertanto, ottenere alcune indicazioni utili specialmente nella fase di costruzione della struttura dell'orario ferroviario e nella gestione della circolazione.

#### 1. Introduzione

La circolazione di un numero elevato di treni, prossimo al numero massimo corrispondente al valore di capa-

**Summary** - The aspects related to the frequency of the service, travel time and punctuality are becoming increasingly important for passenger satisfaction and the expected level of quality.

In fact, delay is one of the major issues that rail systems around the world are facing through predictive analyses and mitigating actions. The railway timetable therefore requires the best *trade-off* between the elements connected to the capacity of the infrastructure, in terms of train paths that can be allocated, and the regularity of the service.

This work investigates the effects of delay propagation in relation to a given value of the number of trains circulating in the unit of time. The study environment has the Rome-Florence “Direttissima” high-speed line as its reference, the backbone of the Turin-Milan-Naples high-speed dorsal.

Thus, we want to study the response of the railway system to the variation of the headway between the trains and in the presence of a source of delay. The phenomenon is described below, first from an analytical point of view under defined ideal conditions and, subsequently, with the support of the OpenTrack<sup>®</sup> railway simulation software considering some timetable configurations. Lastly, the various methodologies used are compared with each other.

Therefore, some useful indications could be obtained especially in the construction phase of the railway timetable structure and in the management of traffic.

#### 1. Introduction

The circulation of a large number of trains, close to the maximum number corresponding to the capacity value,

<sup>(\*)</sup> Università degli Studi Roma Tre, Dipartimento di Ingegneria, Laboratorio di Trasporti.

<sup>(\*)</sup> University of Roma Tre, Department of Engineering, Transport Lab.

cià, deve essere messa in relazione con il mantenimento di un accettabile livello di servizio. I ritardi nella rete ferroviaria sono una fonte di disturbo alle normali operazioni quotidiane e si traducono in una ridotta affidabilità della circolazione ferroviaria e in un minor livello di soddisfazione della clientela.

L'obiettivo del gestore della rete è quello di avere un buon grado di affidabilità del sistema e per raggiungere tale scopo, prima di attuare importanti interventi, si può pensare di agire sull'orario di servizio. L'orario gioca un ruolo chiave in quanto è in grado di evitare potenziali conflitti, minimizzare i ritardi e la propagazione degli stessi sulla circolazione dei treni.

L'affidabilità, la robustezza e la stabilità sono tre tematiche frequentemente prese in considerazione dalle imprese ferroviarie. In letteratura si possono trovare numerosi contributi che descrivono tali aspetti per definire le performance di una linea ferroviaria al fine di stabilire dei livelli di servizio accettabili [1][2][3][4][5].

Il più comune significato di affidabilità (*reliability*) può essere attribuito alla capacità del sistema di svolgere le sue funzioni in maniera regolare. Un sistema ferroviario può essere definito affidabile quando i treni circolano in orario per la maggior parte del tempo e soltanto una piccola parte di essi circola in ritardo o non viene operata affatto [2].

Sebbene l'affidabilità della rete ferroviaria rappresenti una sua importante caratteristica, innumerevoli sono i tentativi di fornire indicatori univoci in grado di stimare senza ambiguità questo aspetto, in quanto esso è influenzato da molteplici fattori, alcuni dei quali ricadono anche sotto la competenza delle imprese ferroviarie e altri, invece, non sono direttamente controllabili.

Alcuni indicatori possono essere i seguenti [6]:

- la puntualità, intesa come la probabilità che un treno arrivi con un ritardo minore di  $x$  minuti;
- la differenza media tra l'orario di arrivo atteso e quello programmato;
- il ritardo medio dei treni che arrivano in ritardo;
- il ritardo medio dei treni che arrivano con un ritardo maggiore di  $x$  minuti;
- la deviazione standard degli orari di arrivo;
- la deviazione standard corretta degli orari di arrivo, escludendo i casi di anticipo.

Altri indicatori possono riguardare [4]:

- regolarità del distanziamento tra due successivi treni;
- numero di corse cancellate;
- numero di guasti al materiale rotabile rapportato ai treni-km percorsi.

La robustezza (*robustness*) indica quanto un sistema ferroviario è affetto da influenze esterne e rappresenta l'abilità del sistema di far fronte ad anomalie di progetta-

*must be related to the maintenance of an acceptable level of service. Delays in the railway network are a source of interference to normal day-to-day operations and result in reduced reliability of railway circulation and a lower level of customer satisfaction.*

*The goal of the network manager is to have a good degree of system reliability and to achieve this goal, one can think of acting on the service timetable before implementing important interventions. The timetable plays a key role as it is able to avoid potential conflicts, minimise delays and their propagation on train circulation.*

*Reliability, robustness, and stability are three issues frequently considered by railway companies. Numerous contributions can be found in literature describing these aspects to define the performance of a railway line in order to establish acceptable service levels [1][2][3][4][5].*

*The most common meaning of reliability can be attributed to the system's ability to perform its functions on a regular basis. A railway system can be defined reliable when trains run on time most of the time and only a small part of them run late or are not operated at all [2].*

*Although the reliability of the railway network represents one of its important characteristics, there are countless attempts to provide univocal indicators capable of estimating this aspect without ambiguity, as it is influenced by many factors, some of which also fall under the competence of railway companies and others, on the other hand, are not directly controllable.*

*Some indicators may be the following [6]:*

- *punctuality, understood as the probability that a train will arrive with a delay of less than  $x$  minutes;*
- *average difference between the expected and scheduled arrival time;*
- *average delay of trains arriving late;*
- *average delay of trains arriving with a delay greater than  $x$  minutes;*
- *standard deviation of arrival times;*
- *standard deviation of arrival times, excluding early arrival cases.*

*Other indicators may concern [4]:*

- *regularity of headway between two consecutive trains;*
- *number of journeys cancelled;*
- *number of rolling stock faults compared to trains-km travelled.*

*Robustness indicates how much a railway system is affected by external influences and represents the ability of the system to address timetable design anomalies and variations in certain parameters or traffic conditions. The lack of robustness of the system favours the presence of big delays that propagate on railway traffic, causing secondary delays.*

zione dell'orario e a variazioni di alcuni parametri o delle condizioni di traffico. La mancanza di robustezza del sistema favorisce la presenza di grandi ritardi che si propagano sulla circolazione ferroviaria, causando i ritardi secondari.

La stabilità (*stability*), infine, può essere vista come la capacità del sistema di svolgere le sue funzioni in un intervallo di tempo esente da fonti di disturbo.

Essa viene attribuita alla possibilità e allo sforzo necessario per far ritornare il sistema allo stato originario dopo una perturbazione [1].

Infatti, in un sistema stabile vengono ripristinate velocemente le condizioni originarie di circolazione in seguito ad un imprevisto, mentre in un sistema instabile le condizioni di irregolarità permangono per lungo tempo.

Questo articolo pone a confronto alcune metodologie analitiche, disponibili in letteratura, con gli approcci simulativi per la stima della propagazione del ritardo. Ciò consente, inoltre, di analizzare l'imprescindibile connubio tra l'impegno di capacità di una linea e il livello di regolarità atteso, aspetti fondamentali per la definizione dell'orario di servizio.

Il presente lavoro è composto da 6 paragrafi, includendo anche l'introduzione.

## 2. Modelli analitici sulla propagazione dei ritardi

In una data località di rilevamento la differenza positiva tra l'orario reale di arrivo/partenza o di transito del treno e quello programmato è definita come ritardo.

I ritardi nella circolazione ferroviaria accadono per cause impreviste e possono essere suddivisi in due classi: ritardi primari e ritardi secondari [1].

I ritardi primari, chiamati anche ritardi iniziali, sono indotti su un treno indipendentemente dagli altri treni. Tali ritardi sono causati da diverse anomalie che possono verificarsi nel sistema ferroviario aventi numerose sorgenti. Alcune di esse possono ricondursi a:

- guasti all'infrastruttura come danni ai binari, deviatori e opere d'arte; avarie al sistema di segnalamento o agli impianti di alimentazione elettrica;
- guasti al materiale rotabile come avarie dell'unità di trazione oppure guasti alle carrozze in relazione all'apertura/chiusura delle porte nelle fermate per servizio viaggiatori;
- fattori umani come inadeguati comportamenti del personale di terra o di bordo;
- presenza di singolarità nell'orario di servizio;
- incidenti ai passaggi a livello (per le linee non appartenenti alla rete AV);
- vandalismi sull'infrastruttura, come i furti dei cavi di rame, o sul materiale rotabile;

*Finally, stability can be seen as the ability of the system to perform its functions in an interval of time free from sources of disturbance.*

*It is attributed to the possibility and effort necessary to restore the system to its original status after a disruption [1].*

*In fact, the original circulation conditions in a stable system are quickly restored following an unforeseen event, while irregular conditions persist for a long time in an unstable system.*

*This article compares some analytical methodologies, available in literature, with simulation approaches for estimating delay propagation. This also allows analysing the essential combination between the capacity consumption of a line and the expected level of regularity, fundamental aspects for defining service hours.*

*This work is made up of 6 paragraphs, also including the introduction.*

## 2. Analytical models on the propagation of delays

*At a given survey location, the positive difference between the actual train arrival/departure or transit time and the scheduled time is defined as a delay.*

*Rail traffic delays occur due to unforeseen causes and can be divided into two classes: primary delays and secondary delays [1].*

*Primary delays, also called initial delays, are induced on a train independently of other trains. These delays are caused by various anomalies that can occur in the railway system with numerous sources. Some of these may be attributed to:*

- *infrastructure failures such as damage to tracks, switches and structures; signalling system or electrical power supply systems failures;*
- *rolling stock fault such as traction unit failures or wagon fault in connection with opening/closing doors at passenger service stops;*
- *human factors such as inadequate behaviour of ground or on-board personnel;*
- *presence of singularities in the timetable;*
- *accidents at level crossings (for lines not belonging to the high-speed network);*
- *vandalism on the infrastructure, such as the theft of copper cables, or on rolling stock;*
- *extension of train stopping times due to a high flow of passengers or waits for ancillary services (refuelling, vehicle cleaning, etc.);*
- *meteorological conditions such as strong temperature fluctuations, which could lead to defects in track geometry with consequent adoption of slowing down or interruption of the line measures, or poor adherence con-*

- prolungamento dei tempi di sosta del treno per un elevato flusso di passeggeri o attese per servizi accessori (rifornimenti, pulizia veicoli ecc.);
- condizioni meteorologiche come forti escursioni termiche, che potrebbero comportare difetti di geometria del binario con conseguente adozione di provvedimenti di rallentamento o interruzione della linea, o cattive condizioni di aderenza che implicano maggiori distanze di frenatura e minori valori di accelerazione.

I ritardi secondari, chiamati anche ritardi consecutivi o *knock-on delays*, avvengono quando la fonte del ritardo è un altro treno. Possono accadere per la presenza di tracce orarie confliggenti ovvero due treni richiedono la stessa risorsa nello stesso istante, come una sezione di blocco, un deviatoio o un binario di stazione e, pertanto, uno dei due treni deve essere soggetto ad un tempo di attesa. Oppure nel caso di coincidenze tra due treni, uno dei due treni può essere ritardato in quanto deve aspettare l'arrivo dell'altro treno per effettuare il trasferimento dei passeggeri.

Pertanto, il ritardo complessivo è più grande a causa della propagazione del ritardo che trasferisce la componente principale di ritardo ai treni che gravitano nell'area soggetta a perturbazione. Quindi, esso può essere visto come la somma dei ritardi primari e dei ritardi secondari (1):

$$\sum t_d = t_{d,1,i} + \sum_{x=2}^x t_{d,x,c} \quad (1)$$

dove:

$t_d$  = è il generico ritardo;

$t_{d,1,i}$  = è il ritardo primario o ritardo iniziale;

$t_{d,x,c}$  = è il ritardo secondario o ritardo consecutivo del treno  $x$ -esimo.

La diffusione dei ritardi nel sistema ferroviario avviene nello spazio e nel tempo ed è dovuta principalmente all'interdipendenza fra due o più tracce che utilizzano una stessa tratta di linea in un dato intervallo temporale.

L'alto grado di utilizzazione di un'infrastruttura ferroviaria è soggetto all'impiego di distanziamenti temporali corti tra i treni con conseguenti ridotti tempi cuscinetto (*buffer times*), dati dalla distanza temporale tra l'istante di fine occupazione di una sezione e l'istante successivo di occupazione della stessa sezione di linea da parte di un altro convoglio.

Negli orari di servizio i tempi cuscinetto sono necessari per ridurre la propagazione dei ritardi. Si aggiunge un tempo cuscinetto al distanziamento minimo realizzabile per assorbire eventuali ritardi di lieve entità. Ciò significa che i ritardi si propagano più velocemente rispetto al caso nel quale sono presenti tempi cuscinetto maggiori che limiterebbero la propagazione del ritardo ai treni successivi, come mostrato nella Fig. 1.

*ditions which imply greater braking distances and lower acceleration values.*

*Secondary delays, also called consecutive delays or knock-on delays, occur when the source of the delay is another train. They can occur due to the presence of conflicting train paths or two trains requiring the same resource at the same time, such as a block section, a switch or a station platform and, therefore, one of the two trains must be subject to a waiting time. Or in the case of connections between two trains, one of the two trains may be delayed as it has to wait for the arrival of the other train to transfer passengers.*

*Therefore, the overall delay is larger due to the propagation of the delay which transfers the main delay component to the trains gravitating in the disrupted area. Hence, it can be seen as the sum of the primary and secondary delays:*

$$\sum t_d = t_{d,1,i} + \sum_{x=2}^x t_{d,x,c} \quad (1)$$

where:

$t_d$  = is general delay;

$t_{d,1,i}$  = is primary delay or initial delay;

$t_{d,x,c}$  = is secondary delay or train consecutive delay  $x$ -eth.

*The spread of delays in the railway system occurs in space and time and is mainly due to the interdependence between two or more train paths that use the same section of the line in a given time interval.*

*The high degree of utilisation of a railway infrastructure is subject to the use of short time distances between trains with consequent reduced buffer times, given by the temporal distance between the instant of end of occupation of a section and the next instant of occupation of the same section of line by another convoy.*

*During service hours buffer times are required to reduce the propagation of delays. A buffer time is added to the minimum achievable headway to absorb any slight delays. This means that the delays propagate faster than if there are longer buffer times which would limit the propagation of the delay to subsequent trains, as shown in Fig. 1.*

*Therefore, a high-capacity consumption translates into a high risk of presence of secondary delays in the railway system.*

*Analysing the propagation of the disruption in detail, it can be assumed that the trains are initially in line with the headway established by the service timetable. Due to the presence of an unforeseen event, the first train stops and, in moments of time following the occurrence of the anomaly and in spatial positions preceding the place of the event, the following trains stop with a certain propagation speed of this kinematic stop wave which can also be defined as a blast or shock wave. The latter, taking up the theory of vehicular flow, represents a boundary between two different*



Pertanto, un alto impegno di capacità si traduce in un alto rischio di avere la presenza di ritardi secondari nel sistema ferroviario.

Analizzando nel dettaglio la propagazione della perturbazione, si può supporre che i treni inizialmente si presentano in linea con il distanziamento stabilito dall'orario di servizio. A causa della presenza di un imprevisto, il primo treno si ferma e, in istanti temporali successivi al verificarsi dell'anomalia e in posizioni spaziali precedenti il luogo dell'evento, si fermano i treni successivi con una certa velocità di propagazione di tale onda cinematica di arresto, definibile altresì come onda d'urto o onda di shock. Quest'ultima, riprendendo la teoria del deflusso veicolare, rappresenta un confine fra due condizioni di traffico differenti, generalmente fra uno stato a flusso libero e uno stato congestionato.

La circolazione ferroviaria riprenderà soltanto dopo che il primo treno è ripartito e con esso ripartiranno i convogli successivi, rispettando il minimo distanziamento ammissibile dal sistema di segnalamento.

L'onda cinematica delle partenze presenta una velocità maggiore rispetto all'onda d'urto di arresto. Se non si avesse tale condizione, i treni investiti dalla perturbazione sarebbero infiniti e non si avrebbe la capacità di assorbire completamente il ritardo. Si tratta di una situazione analoga al caso stradale, con l'arresto e la ripartenza dei veicoli ad un'intersezione semaforizzata. Nella Fig. 2 si può osservare il cono di influenza della perturbazione che investe i treni considerando l'ipotesi di variazioni di velocità istantanee e circolazione omotachica [13][14][38].

Rimanendo nell'analogia con il caso stradale, definendo il flusso veicolare  $Q$  come l'inverso del distanziamento temporale medio tra i veicoli e la densità veicolare  $K$  l'inverso del distanziamento spaziale medio tra i veicoli, si può scrivere la velocità di propagazione della perturbazione in relazione a queste due ultime grandezze e alle due condizioni di circolazione A e B prese in considerazione (2):

$$W_{AB} = \frac{Q_B - Q_A}{K_B - K_A} = \frac{\Delta Q}{\Delta K} \quad (2)$$

Pertanto, a variazioni dello stesso segno del flusso e della densità corrisponde una velocità  $W_{AB}$  positiva dell'onda cinematica, che si propaga verso valle; a variazioni di segno opposto, invece, corrisponde una velocità  $W_{AB}$  negativa dell'onda d'urto, che si propaga verso monte. Le conseguenze di una perturbazione si possono, quindi, prevedere se sono note le condizioni di marcia prima dell'evento e conoscere o ipotizzare ciò che avviene dopo l'evento.

Nel contesto ferroviario si ha una situazione più complessa dal momento che il distanziamento fra i convogli è regolato dal regime di circolazione adottato su quella particolare linea ferroviaria e, nel caso più comune di un si-

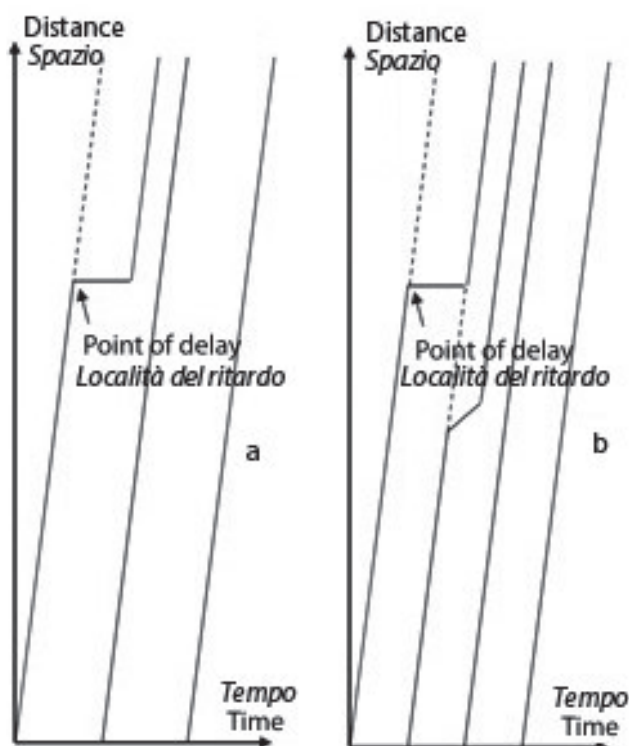


Figura 1 – Propagazione di un lieve ritardo iniziale in una linea ferroviaria con un basso impegno di capacità (a) e con un alto impegno di capacità (b) [12].

Figure 1 – Propagation of a slight initial delay in a railway line with low-capacity consumption (a) and with high capacity consumption (b) [12].

traffic conditions, generally between a free-flowing status and a congested condition.

Railway traffic will resume only after the first train has left and the subsequent trains will depart with it, respecting the minimum headway allowed by the signalling system.

The kinematic wave of departures has a speed greater than the stopping shock wave. If this condition were not present, the trains impacted by the disruption would be infinite and there would not be any ability to completely absorb the delay. This is a situation similar to the road case, with vehicles stopping and restarting at a traffic light intersection. In Fig. 2 the perturbation influence cone affecting the trains can be observed in considering the hypothesis of instantaneous speed variations and homotachic circulation [13][14][38].

Within the analogy with the road case, defining the vehicular flow  $Q$  as the inverse of the average temporal distance between the vehicles and the vehicular density  $K$  the inverse of the average spatial distance between the vehicles, the speed of propagation of the disruption can be written in relation to these last two quantities and to the two circulation conditions A and B taken into consideration:

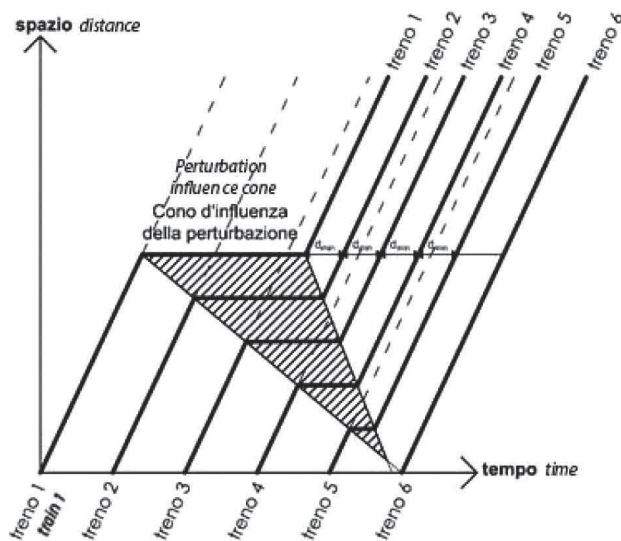


Figura 2 – La propagazione del ritardo.  
Figure 2 – Propagation of the delay.

stema a blocco fisso, le variazioni di velocità potrebbero non avvenire in un'unica sezione di blocco, ovvero la distanza di frenatura potrebbe richiedere più di una sezione di blocco. Ciò influenza, pertanto, l'esatta posizione del collo di bottiglia e la linea di separazione fra l'area a flusso libero e la zona perturbata.

La trattazione analitica di questo fenomeno mette in risalto l'importanza di avere dei tempi cuscinetto adeguati ad assorbire eventuali deviazioni dall'orario programmato dei treni. In assenza di essi, il sistema ferroviario si trova in condizioni di funzionamento prossime alla capacità ed in presenza di un minimo ritardo da parte del primo treno, si genera un effetto domino che si estende all'infinito coinvolgendo tutti i treni che seguono, senza alcuna possibilità che tale ritardo venga assorbito.

Infatti, in tal caso il distanziamento tra i treni prima e dopo l'evento imprevisto rimane il medesimo così come rimane identica l'inclinazione delle onde cinematiche, rispettivamente, di arresto e di partenza.

Si ha, così, l'impossibilità di fronteggiare il ritardo, come si può vedere nella Fig. 3 dove il cono d'influenza della perturbazione non è più una regione chiusa ma aperta. Ciò causa una propagazione infinita del ritardo che coinvolge un numero teoricamente illimitato di treni.

Si evidenzia, pertanto, l'importanza di dimensionare in maniera adeguata i tempi cuscinetto al fine di garantire un giusto compromesso fra l'offerta di trasporto, intesa come treni nell'unità di tempo, e il livello di servizio desiderato. Questo si traduce nel porre un limite massimo del tempo di assorbimento del ritardo ovvero del numero di treni coinvolti.

Di fatto la quota di ritardo propagato riflette la stabilità dell'orario e l'affidabilità della circolazione ferroviaria [15][16].

$$W_{AB} = \frac{Q_B - Q_A}{K_B - K_A} = \frac{\Delta Q}{\Delta K} \quad (2)$$

Therefore, a positive  $W_{AB}$  speed of the kinematic wave, which propagates downstream, corresponds to variations of the same sign of flow and density; on the other hand, variations of opposite sign correspond to a negative  $W_{AB}$  speed of the shock wave, which propagates upstream. The consequences of a disruption can therefore be foreseen if the driving conditions before the event are known and know or hypothesize what happens after the event.

In the railway context there is a more complex situation since the headway between the trains is governed by the circulation regime adopted on that particular railway line and, in the most common case of a fixed block system, the speed variations may not occur in a single block section, i.e. the braking distance may require more than one block section. This therefore affects the exact position of the bottleneck and the dividing line between the free-flowing area and the disrupted area.

The analytical treatment of this phenomenon highlights the importance of having adequate buffer times to absorb any deviations from the scheduled train timetable. In the absence of these, the railway system is in operating conditions close to capacity and in the presence of a minimum delay from the first train, a domino effect that extends to infinity is generated involving all the trains that follow, without any possibility of this delay being absorbed.

In fact, in this case the headway between the trains before and after the unexpected event remains the same as well as the inclination of the kinematic waves of stopping and starting, respectively, remains the same.

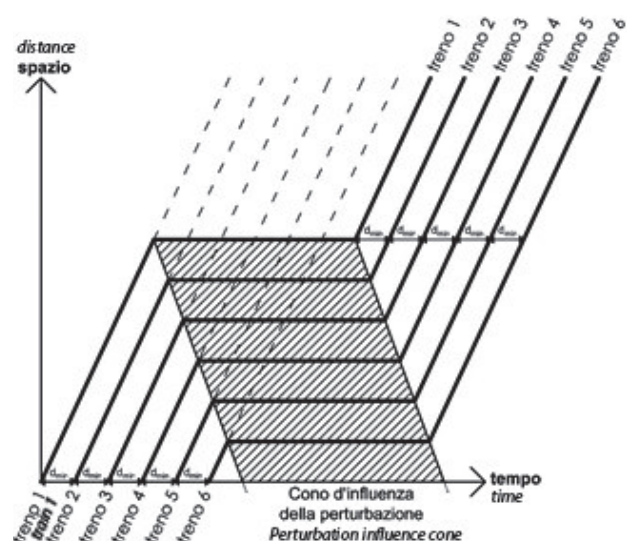


Figura 3 – La propagazione infinita del ritardo.  
Figure 3 – The infinite propagation of the delay.

La metodologia analitica illustrata qui di seguito, proposta dall'autore LANDEX [12], punta ad individuare una relazione tra l'impegno di capacità e l'ammontare dei ritardi.

Viene analizzata la propagazione del ritardo su linee a doppio binario con un traffico omogeneo in ciascuna direzione, intendendo con ciò che la velocità e i tempi cuscinetto sono costanti e uguali per tutti i treni.

Considerando tale situazione idealizzata, si può calcolare il ritardo secondario come differenza tra il ritardo primario e il tempo cuscinetto come mostrato nell'equazione (3)[17]:

$$t_{d,2,c} = \begin{cases} t_{d,1,i} - t_b ; & \text{con } t_b < t_{d,1,i} \\ 0 ; & \text{altrimenti} \end{cases} \quad (3)$$

dove:

$t_{d,2,c}$  = è il ritardo consecutivo del secondo treno;

$t_{d,1,i}$  = è il ritardo primario o ritardo iniziale;

$t_b$  = è il tempo cuscinetto.

Se il tempo cuscinetto  $t_b$  è maggiore o al più uguale al ritardo iniziale  $t_{d,1,i}$ , non si avrà formazione del ritardo secondario  $t_{d,2,c}$  che sarà minore o al più uguale a zero.

La seguente formula generalizza il caso ad uno dei treni qualsiasi che seguono il treno investito dal ritardo primario [18][19]:

$$t_{d,j+1,c} = t_{d,1,i} - j \cdot t_b \quad (4)$$

dove:

$j$  = è il numero dei treni che subiscono i ritardi consecutivi.

Il termine  $j$  può essere esplicitato dall'ultima equazione (4), ponendo il primo membro uguale a zero, il che equivale a dire che l'ultimo treno non riceve il ritardo secondario.

Si trova, così, il numero di treni dopo il quale la circolazione riprende le condizioni normali:

$$j = \frac{t_{d,1,i}}{t_b} \quad (5)$$

Il risultato di tale espressione (5) non necessariamente corrisponde ad un numero intero e pertanto la sua parte decimale va troncata, in quanto il generico treno o è in orario o è in ritardo.

Per esaminare l'influenza di un alto impegno di capacità sulla propagazione del ritardo, il tempo cuscinetto  $t_b$  può essere espresso in relazione all'impegno di capacità percentuale  $K$ , al distanziamento previsto in orario  $t_h$  e al distanziamento minimo temporale  $t_{h,min}$  [19][20][21] (6):

$$t_b = t_h - t_{h,min} = \frac{t_{h,min}}{K} - t_{h,min} = \left(\frac{1}{K} - 1\right) \cdot t_{h,min} \quad (6)$$

Thus, it is impossible to cope with the delay, as can be seen in Fig. 3 where the perturbation influence cone is no longer a closed but an open area. This causes an infinite propagation of the delay involving a theoretically unlimited number of trains.

Therefore, the importance of adequately dimensioning of the buffer times in order to guarantee a fair compromise between the transport offer, understood as trains in the unit of time, and the desired service level is highlighted. This translates into setting a maximum limit of the delay absorption time or the number of trains involved.

In fact, the share of propagated delay reflects the stability of the timetable and the reliability of rail traffic [15][16].

The analytical methodology illustrated below, proposed by the author LANDEX [12], aims to identify a relationship between the capacity consumption and the number of delays.

The propagation of the delay on double-track lines with homogeneous traffic in each direction is analysed, meaning that the speed and buffer times are constant and equal for all trains.

Considering this idealised situation, the secondary delay can be calculated as the difference between the primary delay and the buffer time [17]:

$$t_{d,2,c} = \begin{cases} t_{d,1,i} - t_b ; & \text{with } t_b < t_{d,1,i} \\ 0 ; & \text{or} \end{cases} \quad (3)$$

where:

$t_{d,2,c}$  = is the consecutive delay of the second train;

$t_{d,1,i}$  = is primary delay or initial delay;

$t_b$  = is the buffer time.

If the buffer time  $t_b$  is greater than or at the most equal to the initial delay  $t_{d,1,i}$ , there will be no formation of the secondary delay  $t_{d,2,c}$  which will be less than or at the most equal to zero.

The following formula generalises the case to any one of the trains following the train hit by the primary delay [18][19]:

$$t_{d,j+1,c} = t_{d,1,i} - j \cdot t_b \quad (4)$$

where:

$j$  = is the number of trains experiencing consecutive delays.

The term  $j$  can be made explicit by the last equation (4), setting the first member equal to zero, which means that the last train does not receive the secondary delay.

Thus, the number of trains after which circulation resumes normal conditions is found:

$$j = \frac{t_{d,1,i}}{t_b} \quad (5)$$

Attraverso vari passaggi analitici, omessi per brevità di trattazione, si può ricavare la somma dei ritardi come segue:

$$\sum t_d = \left( \frac{t_{d,1,i}}{\left(\frac{1}{K} - 1\right) \cdot t_{h,min}} + 1 \right) \cdot t_{d,1,i} - \frac{\left(\frac{1}{K} - 1\right) \cdot t_{h,min}}{2} \cdot \left( \frac{t_{d,1,i}}{\left(\frac{1}{K} - 1\right) \cdot t_{h,min}} \right) \cdot \left( \frac{t_{d,1,i}}{\left(\frac{1}{K} - 1\right) \cdot t_{h,min}} + 1 \right) \quad (7)$$

La precedente espressione (7) può essere rappresentata in forma grafica (Fig. 4) prendendo come riferimento un distanziamento minimo  $t_{h,min}$  pari a 4 minuti, misura che rispecchia il più alto dei tempi di occupazione delle sezioni di blocco per un treno AV circolante sulla linea "Direttissima", come descritto nel precedente lavoro [7]. Viene, quindi, messo in relazione il ritardo totale con l'impegno di capacità, al variare dei valori del ritardo iniziale  $t_{d,1,i}$ .

Si può notare come, a partire dal valore di  $K$  pari a 80%, la somma dei ritardi cresce in maniera molto rapida, pertanto è ragionevole che l'UIC consigli un valore massimo dell'85% per l'impegno di capacità nelle ore di punta, in relazione ad una linea di servizio suburbano caratterizzata da traffico omogeneo di treni [22], condizioni di circolazione che rispecchiano le ipotesi di formulazione di questo modello.

The result of this expression (5) does not necessarily correspond to an integer value and therefore its decimal part must be truncated, as the generic train is either on time or late.

To examine the influence of a high capacity consumption on delay propagation, the buffer time  $t_b$  can be expressed in relation to the percentage capacity consumption  $K$ , the expected headway in time  $t_h$  and the minimum temporal headway  $t_{h,min}$  [19][20][21]:

$$t_b = t_h - t_{h,min} = \frac{t_{h,min}}{K} \cdot t_h = \left(\frac{1}{K} - 1\right) \cdot t_{h,min} \quad (6)$$

Through various analytical passages, omitted for the sake of brevity, the sum of the delays can be obtained as follows:

$$\sum t_d = \left( \frac{t_{d,1,i}}{\left(\frac{1}{K} - 1\right) \cdot t_{h,min}} + 1 \right) \cdot t_{d,1,i} - \frac{\left(\frac{1}{K} - 1\right) \cdot t_{h,min}}{2} \cdot \left( \frac{t_{d,1,i}}{\left(\frac{1}{K} - 1\right) \cdot t_{h,min}} \right) \cdot \left( \frac{t_{d,1,i}}{\left(\frac{1}{K} - 1\right) \cdot t_{h,min}} + 1 \right) \quad (7)$$

The previous expression (7) can be represented in graphic form (Fig. 4) taking as a reference a minimum headway  $t_{h,min}$  equal to 4 minutes, a measure that reflects the highest occupation times of the block sections for a HS

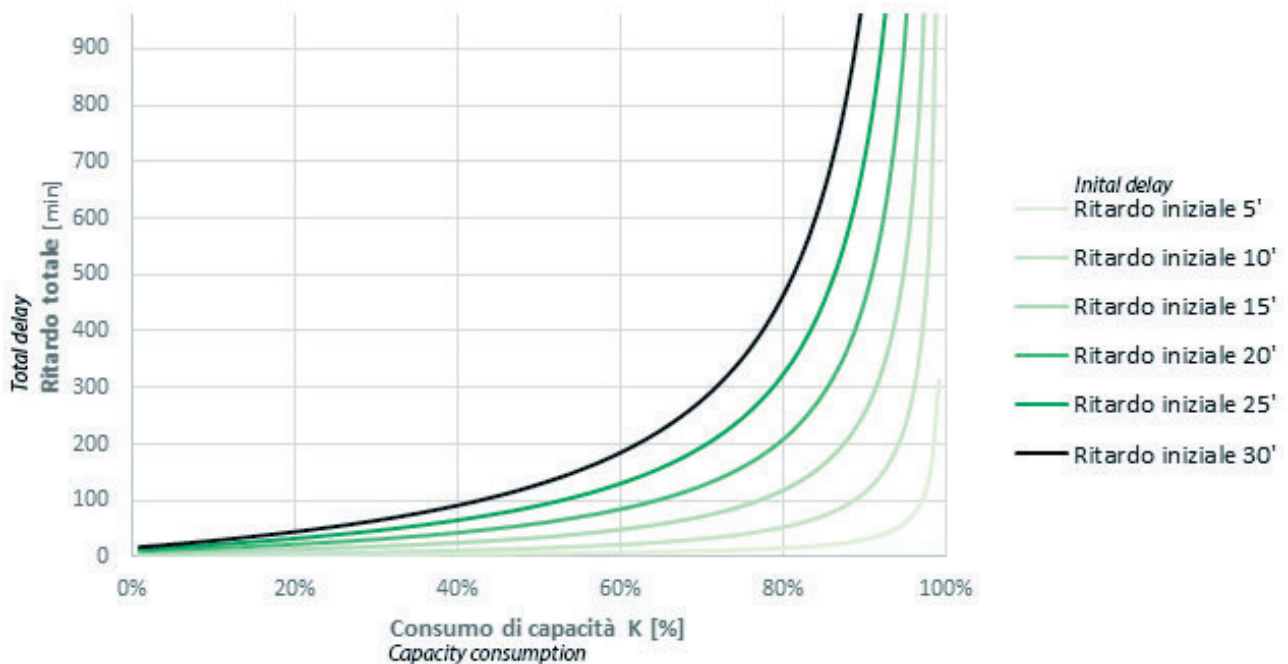


Figura 4 – Relazione tra il ritardo totale e l'impegno di capacità [12].  
Figure 4 – Relationship between total delay and capacity consumption [12].



Con riferimento alla linea oggetto di studio ed in generale per qualsiasi linea, supponendo di avere in uno scenario futuro delle condizioni ideali caratterizzate dalla presenza di soli treni ad alta velocità per tutta l'estensione della linea ferroviaria e un distanziamento minimo  $t_{h,min}$  pari a 4 minuti, rispettando, quindi, le ipotesi previste da tale modello, si può ricavare un grafico che descrive l'andamento del ritardo totale al variare del distanziamento programmato  $t_h$  e dei valori del ritardo iniziale  $t_{d,1,i}$ , riportato nella Fig. 5.

Si utilizza la seguente relazione (8) dove il tempo cuscinetto  $t_b$  viene espresso come differenza fra  $t_h$  e il distanziamento minimo  $t_{h,min}$  anziché in relazione all'impegno di capacità  $K$ :

$$\sum t_d = \left( \frac{t_{d,1,i}}{t_h - t_{h,min}} + 1 \right) \cdot t_{d,1,i} - \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{t_{d,1,i}}{t_h - t_{h,min}} \right) \cdot \left( \frac{t_{d,1,i}}{t_h - t_{h,min}} + 1 \right) \cdot t_b \quad (8)$$

Si può notare come, a partire da un valore del distanziamento programmato  $t_h$  pari a 6 minuti, il ritardo totale tenda a diminuire sempre di più.

Nella Fig. 6 viene descritta la relazione tra il numero di treni  $j$  e il distanziamento programmato  $t_h$  al variare del ritardo iniziale  $t_{d,1,i}$ .

Si può osservare l'andamento a gradini delle diverse curve in virtù del fatto che il parametro  $j$  è espresso in forma intera.

train running on the "Direttissima" line, as described in the previous work [7]. The total delay is then related to the capacity consumption, as the values of the initial delay  $t_{d,1,i}$  vary.

It can be observed that, starting from the value of  $K$  equal to 80%, the sum of the delays grows very rapidly, therefore it is reasonable that the UIC recommends a maximum value of 85% for the capacity consumption in peak hours, in relation to a suburban service line characterised by homogeneous train traffic [22], circulation conditions that reflect the formulation hypotheses of this model.

With reference to the line case study and in general for any line, assuming that in a future scenario there are ideal conditions characterised by the presence of only high-speed trains for the entire extension of the railway line and a minimum headway  $t_{h,min}$  equal to 4 minutes, respecting, therefore, the hypotheses foreseen by this model, a graph can be obtained that describes the trend of the total delay as the planned headway  $t_h$  and the values of the initial delay  $t_{d,1,i}$  vary, shown in Fig. 5.

The following relation is used (8) where the buffer time  $t_b$  is expressed as the difference between  $t_h$  and the minimum headway  $t_{h,min}$  instead of in relation to the capacity consumption  $K$ :

$$\sum t_d = \left( \frac{t_{d,1,i}}{t_h - t_{h,min}} + 1 \right) \cdot t_{d,1,i} - \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{t_{d,1,i}}{t_h - t_{h,min}} \right) \cdot \left( \frac{t_{d,1,i}}{t_h - t_{h,min}} + 1 \right) \cdot t_b \quad (8)$$

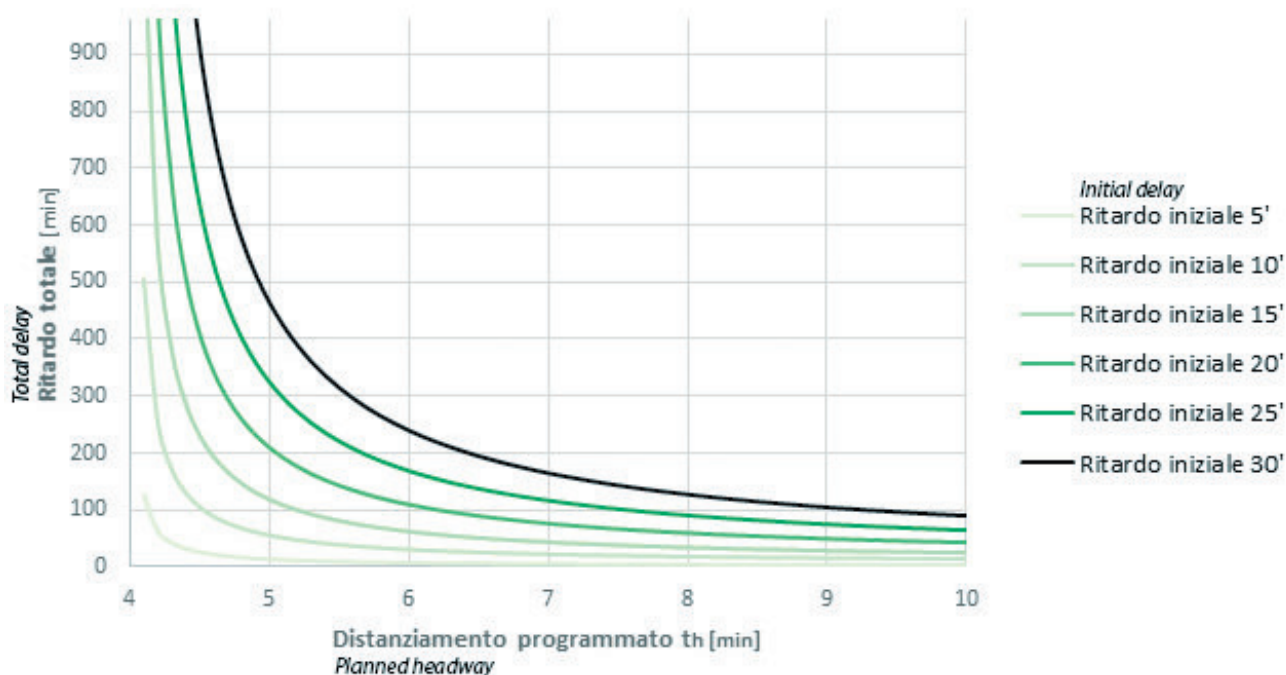


Figura 5 – Relazione tra il ritardo totale e il distanziamento programmato.  
Figure 5 – Relation between the total delay and the planned headway.

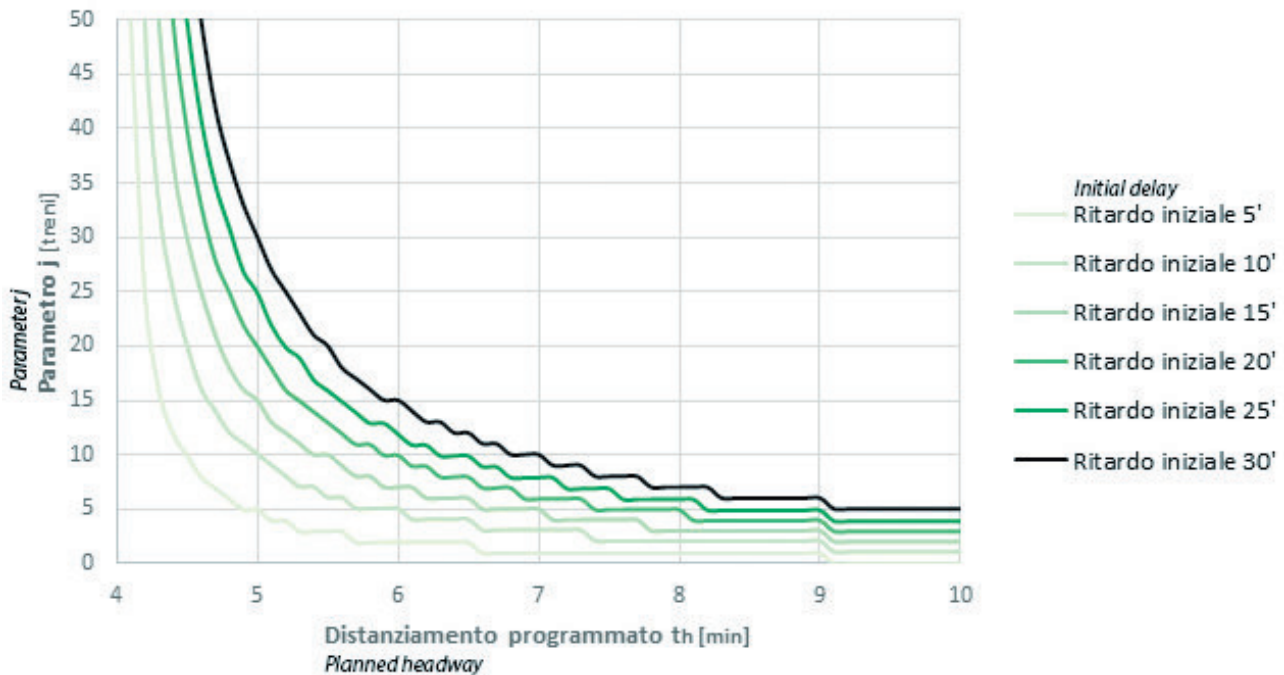


Figura 6 – Relazione tra il n. di treni coinvolti dal ritardo secondario e il distanziamento programmato.  
 Figure 6 – Relationship between no. of trains involved in the secondary delay and the planned headway.

Infine, riprendendo il metodo analitico proposto dall'UIC nel 1983 nella pubblicazione della fiche UIC 405-1 "Method to be used for the determination of the capacity of lines" per la stima della potenzialità di una sezione di linea ferroviaria, quest'ultima si può definire come segue:

$$P = \frac{T}{t_{h,min} + t_b + t_{zu}} \quad (9)$$

dove:

$P$  = potenzialità della sezione espressa in numero di treni nell'unità di tempo;

$T$  = periodo di riferimento espresso in minuti;

$t_{h,min}$  = intervallo medio di distanziamento minimo dei treni espresso in minuti;

$t_b$  = margine di ampliamento espresso in minuti;

$t_{zu}$  = tempo supplementare dipendente dal numero di sezioni di blocco intermedie ed espresso in minuti.

Adottando un approccio basato sulla teoria delle code e concentrando l'attenzione sul parametro  $t_b$ , esso può essere visto come un tempo cuscinetto da dimensionare adeguatamente per limitare gli effetti della propagazione del ritardo e la formazione di "code".

La coda si forma se i tempi di servizio, per un certo intervallo di tempo, sono superiori ai tempi di arrivo. In altri termini, se il tempo di percorrenza della sezione di

It can be observed how the total delay tends to decrease more and more, starting from a value of the headway  $t_h$  equal to 6 minutes.

In Fig. 6 the relationship is described between the number of trains  $j$  and the planned headway  $t_h$  as the initial delay  $t_{d,i}$  varies.

The stepped trend of the different curves can be observed by virtue of the fact that parameter  $j$  is expressed in integer form.

Finally, taking up the analytical method proposed by UIC in 1983 in the publication of the UIC 405-1 fiche "Method to be used for the determination of the capacity of lines" for estimating the capacity of a section of railway line, the latter can be defined as follows:

$$P = \frac{T}{t_{h,min} + t_b + t_{zu}} \quad (9)$$

where:

$P$  = capacity of the section expressed in number of trains in the unit of time;

$T$  = reference period expressed in minutes;

$t_{h,min}$  = average interval for minimum headway expressed in minutes;

$t_b$  = expansion margin expressed in minutes;

$t_{zu}$  = additional time depending on the number of intermediate block sections and expressed in minutes.

blocco critica della linea è superiore all'intervallo tra un treno e l'altro.

Pertanto, per poter smaltire la coda completamente e far funzionare correttamente il sistema è necessario che l'intensità di traffico  $\Psi$  (o fattore di utilizzazione  $\rho$  o tasso di occupazione del singolo canale) sia inferiore all'unità (10):

$$\Psi = \rho = \frac{\lambda}{\mu} = \frac{\frac{1}{t_{h,\min} + t_b}}{\frac{1}{t_{h,\min}}} = \frac{t_{h,\min}}{t_{h,\min} + t_b} \quad (10)$$

con  $\lambda$  rappresentante il tasso medio degli arrivi e  $\mu$  il tasso medio di servizio.

Nell'ipotesi di un sistema M/M/1 e una distribuzione di Poisson per gli intervalli di arrivo tra un treno e l'altro, si può definire la lunghezza media della coda  $L_q$  come segue:

$$L_q = \frac{\rho}{(1-\rho)} \quad (11)$$

Il metodo UIC definisce i seguenti valori di soglia per il fattore di utilizzazione  $\rho$ :

- $\rho = 0,6$  per un periodo molto esteso di tempo corrispondente al funzionamento a regime del sistema con un numero medio di utenti in coda pari a 1,5. Esso equivale a rinunciare a più della metà della capacità della linea;
- $\rho = 0,75$  per un breve periodo di tempo, come le ore di punta, e corrispondente a 3,1 utenti in coda.

Mettendo in relazione il distanziamento programmato  $t_h$  con la lunghezza della coda  $L_q$  così come definita nell'equazione (11), si ricava che più di un treno viene perturbato se il distanziamento ricade nell'area definita da  $\rho > 0,6$ . L'andamento della curva cresce verso un valore infinito del numero di treni perturbati al tendere del distanziamento verso il suo valore minimo (Fig. 7).

Il ritardo medio per treno, invece, può essere ricavato come mostrato nell'equazione (12) [31]

$$w = \frac{\rho}{(\mu - \lambda)} = (t_{h,\min} + t_b) \cdot \frac{\rho^2}{(1-\rho)} \quad (12)$$

### 3. Descrizione del caso di studio

L'utilizzo dell'ambiente di simulazione prevede la valutazione, attraverso vari scenari, dell'impatto di un ritardo primario sulla successione dei convogli a parità di altri fattori quali stesso tempo di percorrenza programmato, stessi allungamenti di percorrenza distribuiti e stessi distanziamenti fra i treni, ovvero stessi tempi cuscinetto fra i treni. In questo modo è possibile valutare l'entità dei ritardi secondari causati dalla presenza dell'evento im-

*By adopting an approach based on queuing theory and focusing attention on the parameter  $t_b$ , it can be seen as a buffer time to be adequately sized to limit the effects of delay propagation and the formation of "queues".*

*The queue is formed if the service times, for a certain time interval, are higher than the arrival times. In other words, if the travel time of the critical block section of the line is greater than the intermediate time between one train and another.*

*Therefore, in order to be able to clear the queue completely and make the system work properly, traffic density  $\Psi$  (or utilisation factor  $\rho$  or single channel occupancy rate) must be less than one unit:*

$$\Psi = \rho = \frac{\lambda}{\mu} = \frac{\frac{1}{t_{h,\min} + t_b}}{\frac{1}{t_{h,\min}}} = \frac{t_{h,\min}}{t_{h,\min} + t_b} \quad (10)$$

*with  $\lambda$  representing the average rate of arrivals and  $\mu$  the average service rate.*

*Assuming an M/M/1 system and a Poisson distribution for the intermediate arrival times between one train and another, the average queue length  $L_q$  can be defined as follows:*

$$L_q = \frac{\rho}{(1-\rho)} \quad (11)$$

*The UIC method defines the following threshold values for the utilisation factor  $\rho$ :*

- $\rho = 0.6$  for a very long period of time corresponding to the system operation at full speed with an average number of users in queue equal to 1.5. It is equivalent to giving up more than half of the line's capacity;
- $\rho = 0.75$  for a short period of time, such as peak hours, corresponding to 3.1 users in the queue.

*Relating the planned headway  $t_h$  with the queue length  $L_q$  as defined in the equation (11), we obtain that more than one train is disrupted if the headway falls within the area defined by  $\rho > 0.6$ . The trend of the curve increases towards an infinite value of the number of trains disrupted as the headway tends towards its minimum value (Fig. 7).*

*The average delay per train, on the other hand, can be obtained as follows [31]:*

$$w = \frac{\rho}{(\mu - \lambda)} = (t_{h,\min} + t_b) \cdot \frac{\rho^2}{(1-\rho)} \quad (12)$$

### 3. Case study description

*The use of the simulation environment involves the evaluation, through various scenarios, of the impact of a*

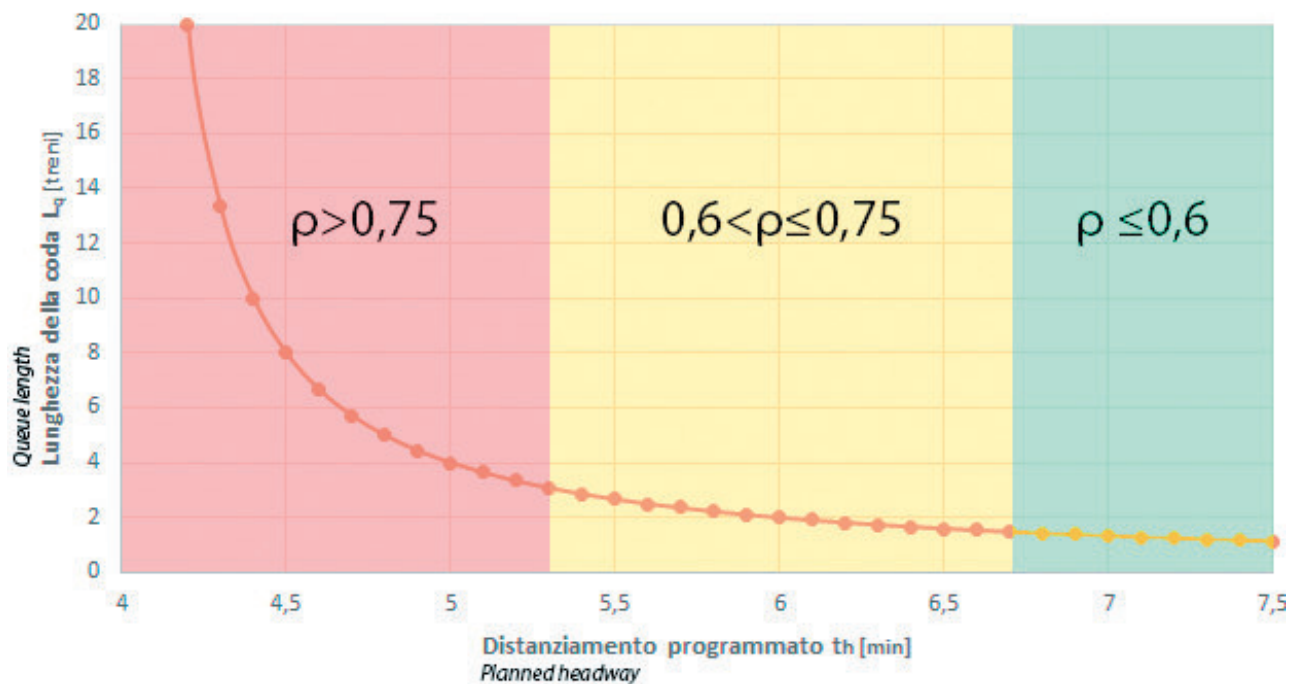


Figura 7 – Relazione tra la lunghezza della coda e il distanziamento programmato nelle aree di soglia per  $\rho$  definite dal metodo UIC.

Figure 7 – Relation between the queue length and the planned headway in the threshold areas for  $\rho$  defined by the UIC method.

previsto ed analizzare le relazioni fra le variabili che governano il fenomeno.

La linea oggetto di studio è la “Direttissima” Roma-Firenze. Si tratta di una linea a doppio binario, completata nel 1992 [30], che connette il capoluogo laziale al capoluogo toscano mediante un tracciato di lunghezza pari a circa 254 km con una velocità di percorrenza massima pari a 250 km/h e un sistema di distanziamento concepito con il blocco elettrico automatico a correnti codificate (9 codici)\*.

Le interconnessioni attualmente presenti tra Settebagni (nodo di Roma) e Firenze Rovezzano (nodo di Firenze) vengono riportate nella Fig. 8:

L’analisi dell’orario permette di rilevare il numero e la tipologia dei treni che circolano sulla linea oggetto di studio.

Sulla linea DD circolano treni che svolgono tre principali tipologie di servizi:

- alta velocità (nel seguito denominato AV);
- intercity (nel seguito denominato IC);
- regionale (nel seguito denominato RV).

Con l’eccezione di pochissimi casi particolari, si pos-

primary delay on the succession of trains with the same other factors such as the same scheduled travel time, the same distributed recovery times and the same headway between the trains, i.e. same buffer times between trains. In this way the entity of the secondary delays caused by the presence of the unexpected event can be evaluated and the relationships between the variables that govern the phenomenon can be analysed.

The line case study is the “Direttissima” Rome-Florence. It is a double track line, completed in 1992 [30], which connects the Lazio capital to the Tuscan capital through a route of approximately 254 km in length with a maximum travel speed of 250 km/h and a headway system conceived with the coded-current automatic block signalling (9 codes)\*.

The current interconnections between Settebagni (Rome node) and Florence Rovezzano (Florence node) are shown in Fig. 8:

The analysis of the timetable allows detecting the number and type of trains circulating on the line case study.

Trains circulating on the DD line perform three main types of services:

- high speed (hereinafter referred to as HS);

(\*) Al momento della stesura del presente articolo, la linea è stata oggetto di un intervento di upgrade riguardante l’adozione del sistema ETCS L2 nella tratta Firenze Rovezzano-Arezzo Nord [37].

(\*) At the time of writing this article, the line was subjected to an upgrade regarding the adoption of the ETCS L2 system in the Florence Rovezzano-Arezzo Nord section [37].



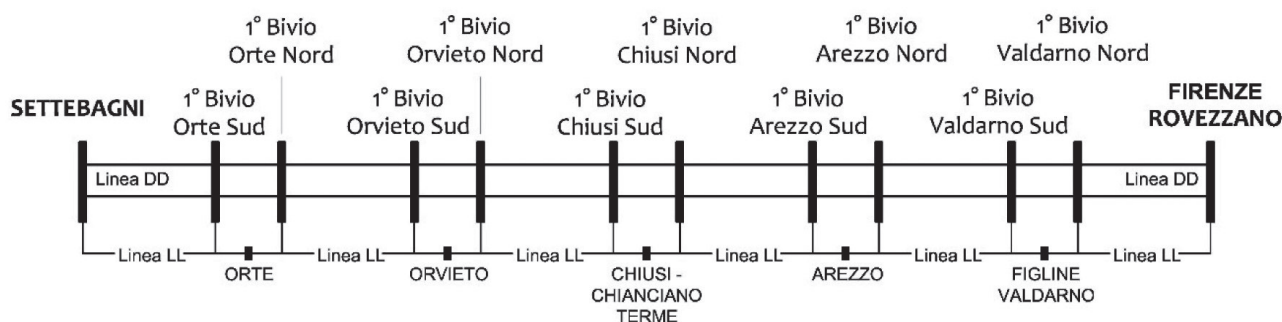


Figura 8 – Le interconnessioni della linea DD con la linea LL.

Figure 8 – Interconnections of the DD line with the LL line.

sono stabilire tre sezioni di linea fondamentali per entrambe le direzioni della linea, nelle quali si hanno caratteristiche omogenee di circolazione dei treni, in termini di categorie e di utilizzo della linea DD [7]:

- Settebagni - 1° Bivio Orte Sud e viceversa (lunghezza 48 km) che vede una circolazione mista di treni AV, IC e RV;
- 1° Bivio Orte Sud - 1° Bivio Valdarno Nord e viceversa (lunghezza 170 km) caratterizzata principalmente dalla sola circolazione di treni AV;
- 1° Bivio Valdarno Nord – Firenze Rovezzano e viceversa (lunghezza 19 km) avente le stesse peculiarità della prima sezione di linea sopra descritta.

Come visto in precedenza, le possibili fonti di ritardo sono numerose e, fra queste, i guasti all'infrastruttura e al materiale rotabile rappresentano la causa che maggiormente impatta sulla regolarità di esercizio.

Occorre, pertanto, individuare un valore rappresentativo del ritardo iniziale per poter simulare la presenza di un'anormalità nel caso di studio in questione. A tal proposito, dalla letteratura si può evincere che un'estesa campagna di analisi effettuata sulla rete ferroviaria italiana ha permesso di rilevare le durate delle varie tipologie di avarie, aventi una distribuzione di probabilità teorica lognormale con il valore più frequente che si attesta intorno ai 15 minuti, come indicato nella Fig. 9 [23][24].

#### 4. La simulazione di vari scenari di ritardo

Mediante uno studio basato sulla simulazione si può analizzare la ri-

– *intercity (hereinafter referred to as IC);*

– *regional (hereinafter referred to as FR).*

*With the exception of very few special cases, three fundamental line sections can be established for both directions of the line, in which there are homogeneous characteristics of train circulation, in terms of categories and use of the DD line [7]:*

- *Settebagni - 1<sup>st</sup> Junction Orte Sud and vice versa (length*

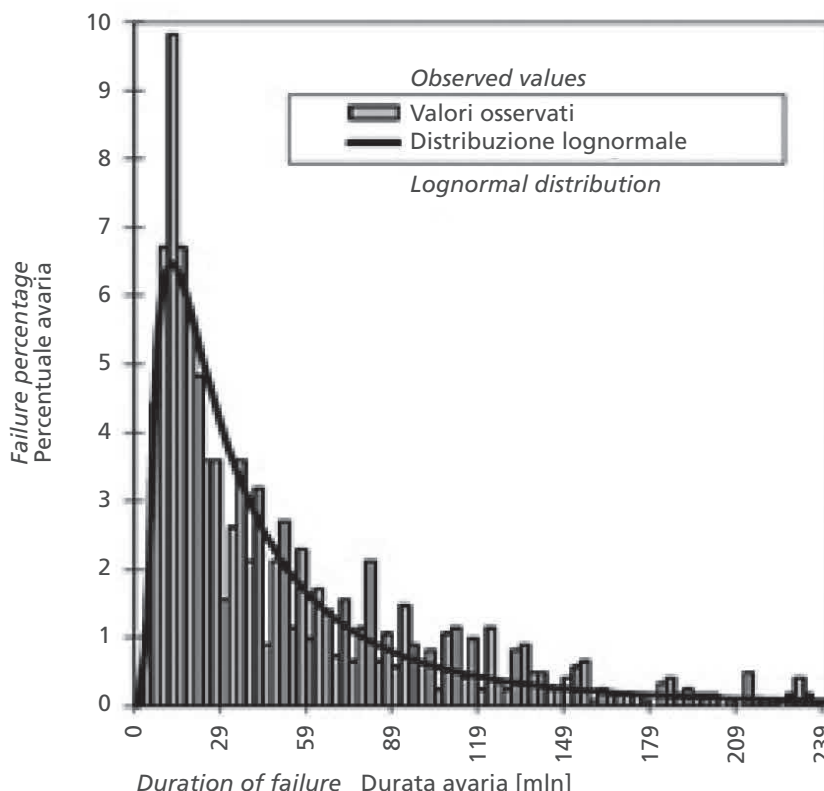


Figura 9 – Distribuzione di frequenza osservata e teorica (lognormale) delle avarie [23].

Figure 9 – Observed and theoretical (lognormal) frequency distribution of failures [23].

sposta del sistema ferroviario sotto determinate condizioni di perturbazione e delineare una previsione dei livelli di regolarità, attività fondamentale per la programmazione dell'orario e dell'esercizio ferroviario.

Per il presente studio ci si avvale del supporto del software di simulazione ferroviaria OpenTrack® (Fig. 10), in dotazione al Laboratorio di Trasporti dell'Università degli Studi Roma Tre.

Sono analizzati, per ogni direzione, differenti scenari mediante il software sopra menzionato. Essi si basano sull'applicazione di un ritardo primario pari a 15 minuti, associabile ad una qualsiasi tipologia di avaria. Ogni scenario si caratterizza con una struttura d'orario analoga a quella presa in esame ma avente differenti distanziamenti tra i treni, pertanto si hanno differenti impegni di capacità. L'individuazione della posizione dell'anormalità si basa sullo studio di tre scenari iniziali, al fine di valutare lo scenario più sfavorevole.

Nel caso di studio si ipotizza che il tempo di percorrenza minimo programmato esistente in orario sia composto soltanto da allungamenti di tempo distribuiti in quanto la linea, oggetto di analisi, ha origine e termine alle estremità dei nodi di Roma e Firenze ovvero si estende tra le località di Settebagni e Firenze Rovezzano.

Le simulazioni sono, quindi, effettuate concentrando l'attenzione sugli allungamenti di tempo distribuiti, diffe-

48 km) which sees a mixed circulation of high-speed, IC and Fast Regional trains;

- 1<sup>st</sup> Junction Orte Sud - 1<sup>st</sup> Junction Valdarno Nord and vice versa (length 170 km) characterised mainly by the circulation of high-speed trains;
- 1<sup>st</sup> Junction Valdarno Nord - Florence Rovezzano and vice versa (length 19 km) with the same characteristics as the first section of the line described above.

As seen above, the possible sources of delays are numerous and, among these, failures in the infrastructure and rolling stock represent the cause that has the greatest impact on regularity of operation.

A value representative of the initial delay must therefore be identified in order to simulate the presence of an abnormality in the case study in question. In this regard, it can be inferred from literature that an extensive analysis campaign carried out on the Italian railway network allowed detecting the durations of the various types of breakdowns, with a lognormal theoretical probability distribution with the most frequent value of around 15 minutes, as indicated in Fig. 9 [23][24].

## 4. The simulation of various delay scenarios

The response of the railway system under certain conditions of disruption can be analysed by means of a simula-

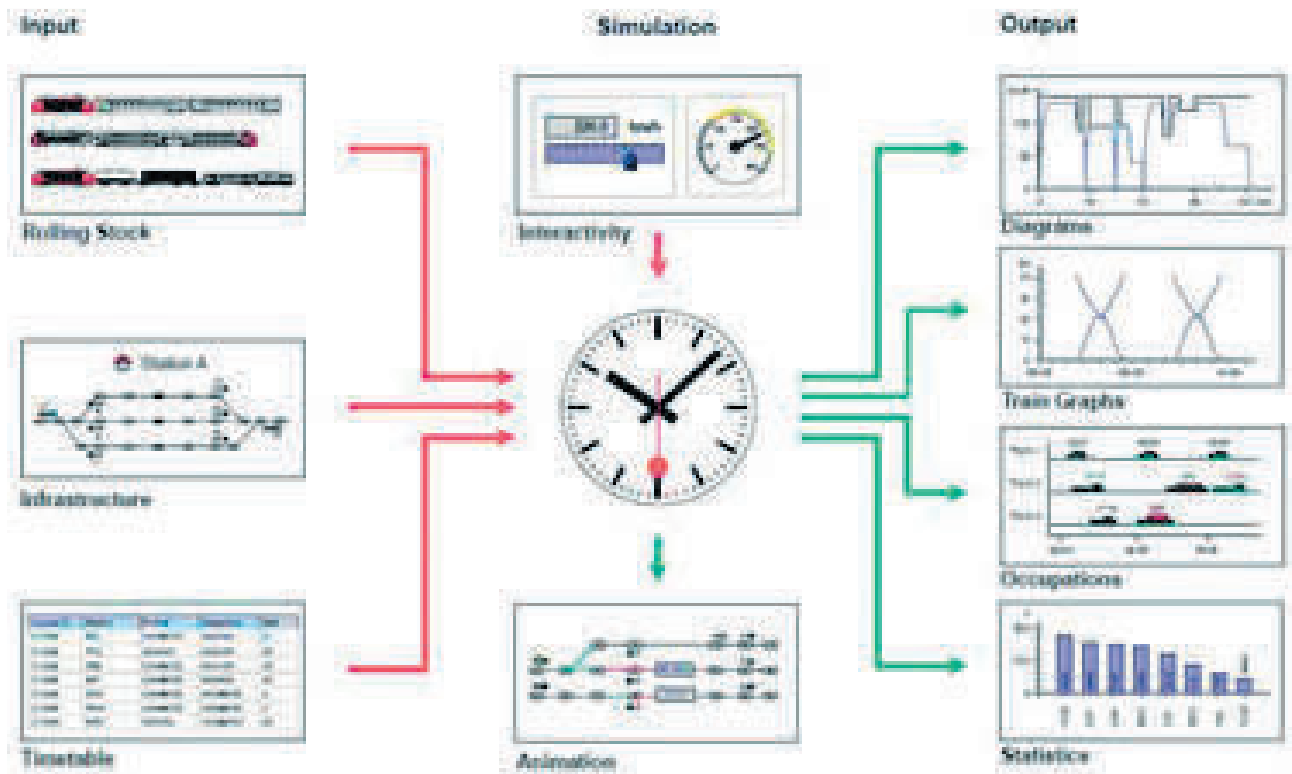


Figura 10 – L'architettura logica di OpenTrack®: Input-Simulazione-Output [25].

Figure 10 – Logical architecture of OpenTrack®: Input-Simulation-Output [25].

renti dagli allungamenti di tempo concentrati nei nodi metropolitani, non essendo questi ultimi influenti per la tratta di studio.

Pertanto, i ritardi individuati sono da imputarsi ai tempi previsti di passaggio in piena linea e al punto di ingresso nei nodi, all'interno dei quali si potrebbe assistere ad una riduzione del ritardo grazie ai margini aggiuntivi di tempo concentrati. Ciò permette la possibilità ad un treno, non in forte ritardo, di giungere comunque in orario nella stazione di arrivo prevista.

I risultati che si ottengono a valle di ogni simulazione sono i seguenti:

- il ritardo totale;
- la durata della perturbazione, cioè il tempo trascorso dall'istante in cui è avvenuta la perturbazione fino al ristabilirsi della normale circolazione. In altre parole, prendendo in esame il caso nel quale avviene un conflitto fra i gradini di occupazione delle sezioni di blocco [8][9][10][11], si determina l'intervallo di tempo che intercorre dall'istante di inizio del ritardo all'istante nel quale l'ultimo treno coinvolto dal ritardo subisce un rallentamento a causa del treno precedente. Viene, quindi, valutata l'entità della propagazione del ritardo;
- l'ammontare dei delta ritardo all'inizio e alla fine della linea, al fine di valutare se il ritardo venga recuperato o aumenti;
- la media dei ritardi in arrivo di tutti i treni;
- il numero dei treni coinvolti dalla perturbazione.

Il ritardo prodotto da un'avaria dipende dall'istante di accadimento dell'imprevisto ( $t_1$ ), dall'istante di arrivo del primo treno ( $t_2$ ), dall'istante di termine del guasto ( $t_3$ ) e dalla posizione dell'evento. Pertanto, il ritardo viene calcolato come differenza tra  $t_3$  e  $t_2$  come si può vedere nella Fig. 11.

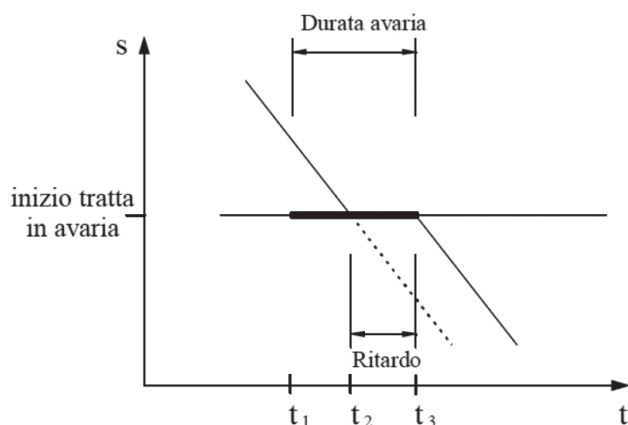


Figura 11 – Determinazione del ritardo di un treno [23].

Figure 11 – Determination of a train delay [23].

tion-based study, and a forecast of the levels of regularity can be outlined, a fundamental activity for scheduling and railway operations.

For this study we use the support of the OpenTrack© (Fig. 10) railway simulation software Figure 10, supplied by the Transport Laboratory of the Roma Tre University.

Different scenarios are analysed for each direction by means of the aforementioned software. They are based on the application of a primary delay of 15 minutes, which can be associated with any type of failure. Each scenario features a timetable structure similar to that taken into consideration but with different headway between trains, therefore there are different capacity consumptions. The identification of the position of the abnormality is based on the study of three initial scenarios, in order to evaluate the most unfavourable scenario.

In the case study, it is assumed that the minimum planned travel time existing on time is composed only of distributed recovery times as the line being analysed, originates and finishes at the ends of the Rome and Florence nodes or extends between the localities of Settebagni and Florence Rovezzano.

The simulations are therefore carried out by focusing attention on the distributed recovery times, different from the recovery times concentrated in the metropolitan nodes, the latter not being influential for the study section.

Therefore, the delays identified are attributable to the expected times of passage in full line and at the entry point into the nodes, within which a reduction of the delay could be observed thanks to the additional concentrated time margins. This allows a train, without excessive delay, to arrive in any case on time at the scheduled arrival station.

The results obtained downstream of each simulation are the following:

- total delay;
- duration of the disruption, that is the time elapsed from the instant in which the disruption occurred until the reestablishment of normal circulation. In other words, by examining the case in which a conflict occurs between the occupation steps of the block sections [8][9][10][11], the time interval from the delay start instant to the instant in which the last train involved in the delay slows down due to the previous train is determined. The entity of the delay propagation is then evaluated;
- the amount of delta delays at the beginning and at the end of the line, in order to assess whether the delay is recovered or increases;
- the average of the arrival delays of all trains;
- the number of trains involved in the disruption.

The delay produced by a fault depends on the instant of the unexpected occurrence ( $t_1$ ), on the instant of arrival of the first train ( $t_2$ ), on the instant of end of the fault ( $t_3$ ) and

La posizione dell'imprevisto, oltre che la durata, gioca un ruolo importante: l'impatto del ritardo è maggiore se si verifica in una zona intermedia di una tratta interstazionale dal momento che i treni sono costretti ad effettuare la completa fase di decelerazione dalla velocità d'orario, fermarsi e, successivamente, accelerare fino alla velocità di regime.

La fase iniziale dello studio si basa, quindi, sull'individuazione della sezione di blocco più sfavorevole dal punto di vista dell'applicazione del ritardo primario, in maniera da avere le perturbazioni maggiori.

A tal proposito, per ciascuna direzione, vengono costruiti tre scenari denominati 1A, 1B e 1C. In ognuno di essi, il ritardo primario è applicato in una particolare sezione di linea considerando quella maggiormente penalizzante per una data successione di treni secondo quanto già definito in un precedente studio [7].

#### 4.1 Linea Settebagni-Firenze Rovezzano

Analizzando la direzione pari, si considera la fascia oraria di punta del mattino e si separano i treni secondo i loro distanziamenti medi, mantenendo la stessa struttura d'orario con gli stessi casi di successione. Vengono applicati i seguenti distanziamenti medi  $t_{fm\ orario}$  a fronte di un distanziamento minimo  $t_{h,min}$  di 4 minuti per la successione consecutiva di treni veloci che impegnano l'intera linea:

$$t_{fm\ orario} (\text{treno AV} - \text{treno AV}) = 6,5 \text{ minuti};$$

$$t_{fm\ orario} (\text{treno AV} - \text{treno RV}) = 3,5 \text{ minuti};$$

$$t_{fm\ orario} (\text{treno RV} - \text{treno AV}) = 9 \text{ minuti}.$$

I tre scenari iniziali sono così costruiti (Tab. 1):

- scenario 1A: il ritardo primario è applicato nell'ultima sezione di blocco della prima tratta Settebagni – 1° Bivio Orte Sud e rilevante per la successione treno lento – treno veloce;

on the location of the event. Therefore, the delay is calculated as the difference between  $t_3$  and  $t_2$  as can be seen in Fig. 11.

The position of the unexpected event, as well as the duration, plays an important role: the impact of the delay is greater if it occurs in an intermediate area of an interstation section since the trains are forced to carry out the complete deceleration phase from the timetable speed, stop and then accelerate to full speed.

The initial phase of the study is therefore based on the identification of the most unfavourable block section from the point of view of the application of the primary delay, so as to have the greatest disruptions.

In this regard, three scenarios called 1A, 1B and 1C are constructed for each direction. In each of them, the primary delay is applied in a particular section of the line considering the most penalising one for a given succession of trains as defined in a previous study [7].

#### 4.1 Settebagni-Florence Rovezzano Line

Analysing the up line, the morning peak hours are considered and the trains are separated according to their average headway, maintaining the same timetable structure with the same cases of succession. The following average headway  $t_{fm\ hourly}$  are applied against a minimum headway  $t_{h,min}$  of 4 minutes for the consecutive succession of fast trains that engage the entire line:

$$t_{fm\ hourly} (\text{HS train} - \text{HS train}) = 6.5 \text{ minutes};$$

$$t_{fm\ hourly} (\text{HS train} - \text{FR train}) = 3.5 \text{ minutes};$$

$$t_{fm\ hourly} (\text{FR train} - \text{HS train}) = 9 \text{ minutes}.$$

The three initial scenarios are constructed as follows (Tab. 1):

- scenario 1A: the primary delay is applied in the last block section of the first section Settebagni – 1<sup>st</sup> Junction Orte Sud and relevant for the slow train – fast train succession;

- scenario 1B: the primary delay is applied in the critical block section for the succession of fast trains considering only the first section Settebagni – 1<sup>st</sup> Junction Orte Sud;

- scenario 1C: the primary delay is applied in the critical block section for the succession of fast trains considering the entire line from Settebagni to Florence Rovezzano.

The following considerations can be drawn from the analysis of these three initial scenarios:

- in scenario 1A, the delay applied to the FR train affects the subsequent HS trains only in the last part of the Settebagni – 1<sup>st</sup> Junction Orte Sud section;

Tabella 1 – Table 1

Riepilogo scenari iniziali simulati (direzione pari)  
Summary of initial simulated scenarios (up line)

Scenario (direzione pari) Scenario (up line)	Intensità del traffico Traffic intensity	Distanziamento medio Average headway	Durata perturbazione Disruption duration	n° treni perturbati no. of disrupted trains
1a	9,5 treni/h 9.5 trains/h	6,4 minuti 6.4 minutes	76 minuti 76 minutes	6 treni 6 trains
1b	9,5 treni/h 9.5 trains/h	6,4 minuti 6.4 minutes	83 minuti 83 minutes	6 treni 6 trains
1c	9,5 treni/h 9.5 trains/h	6,4 minuti 6.4 minutes	50 minuti 50 minutes	3 treni 3 trains



- scenario 1B: il ritardo primario è applicato nella sezione di blocco critica per la successione dei treni veloci considerando soltanto la prima tratta Settebagni - 1° Bivio Orte Sud;
- scenario 1C: il ritardo primario è applicato nella sezione di blocco critica per la successione dei treni veloci considerando l'intera linea da Settebagni a Firenze Rovezzano.

Dall'analisi di questi tre scenari iniziali si possono trarre le seguenti considerazioni:

- nello scenario 1A il ritardo applicato al treno RV condiziona i successivi treni AV soltanto nell'ultima parte della tratta Settebagni - 1° Bivio Orte Sud;
- nello scenario 1B il ritardo applicato al treno AV coinvolge il successivo treno RV che, avendo una velocità più bassa rispetto al treno AV, influenza il treno AV successivo già nella parte iniziale della tratta Settebagni - 1° Bivio Orte Sud;
- nello scenario 1C il treno RV non viene coinvolto dalla perturbazione e la sua presenza all'interno dell'orario fa da effetto "scudo" alla propagazione del ritardo, in quanto la traccia oraria di un treno lento inserita tra due treni veloci ha bisogno di un ampio intervallo temporale. Ciò favorisce l'assorbimento del ritardo che non coinvolge più di tanto i treni successivi al treno RV in questione.

Da ciò si può evincere come lo scenario più sfavorevole sia lo scenario 1B che costituirà, pertanto, il punto di partenza per le successive analisi. A titolo di esempio, si riporta una figura rappresentante l'ambiente di simulazione. In essa sono indicati con il cerchio giallo i punti dove i treni iniziano la loro riduzione di velocità in virtù del fatto che la successiva sezione di blocco è occupata; con il cerchio rosso si individuano i punti di arresto dei treni al segnale (Fig. 12).

- in scenario 1B the delay applied to the HS train involves the next FR train which, with a lower speed than the HS train, affects the next HS train already in the initial part of the Settebagni - 1<sup>st</sup> Junction Orte Sud section;
- in scenario 1C the FR train is not affected by the disruption and its presence within the timetable acts as a "shield" effect for the propagation of the delay, as the path of a slow train inserted between two fast trains needs a broad time interval. This favours the absorption of the delay which does not involve the trains following the FR train in question to a great extent.

From this it can be inferred that the most unfavourable scenario is scenario 1B which will therefore constitute the starting point for subsequent analyses. By way of example, a figure representing the simulation environment is shown. In it the points where the trains start their speed reduction are indicated with a yellow circle by virtue of the fact that the next block section is occupied; the red circle identifies the stopping points of the trains at the signal (Fig. 12).

The subsequent scenarios will therefore have as reference a primary delay of 15 minutes applied to the high-speed train at the critical block section by applying, from time to time, a different value of the average headway between the HS train and the HS train.

The Tab. 2 output data from the various simulated scenarios are summarised in.

## 4.2 Florence Rovezzano-Settebagni line

In the down line, the morning peak hours are considered, and the trains are separated according to their average headway, maintaining the same timetable structure with the same cases of succession.

Considering the minimum headway  $t_{h,min}$  equal to 4 minutes, the following average headway  $t_{jm}$  hourly are applied:

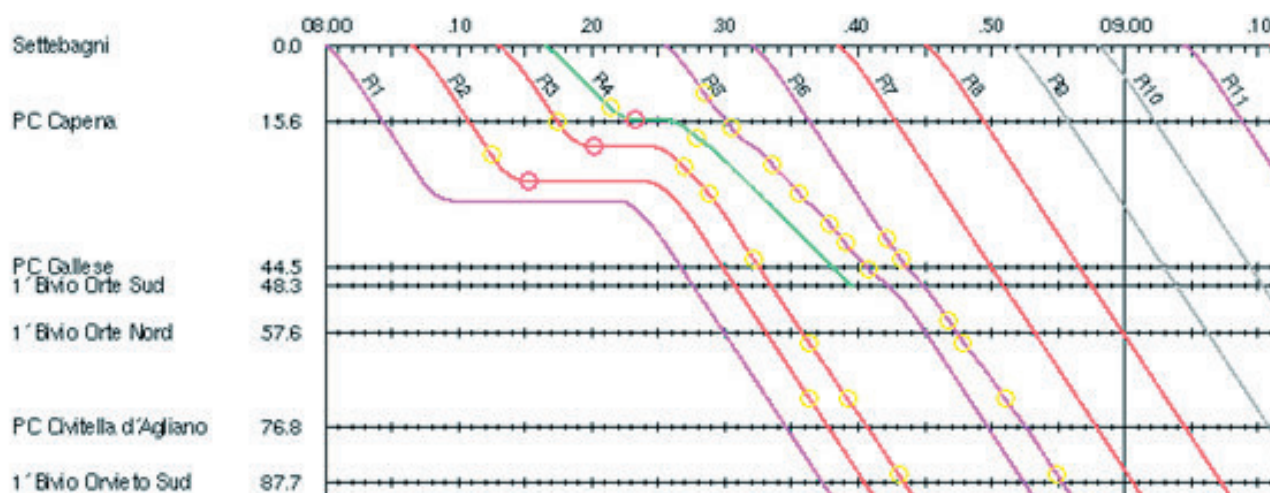


Figura 12 – Scenario 1B (orientamento pari).  
Figure 12 – Scenario 1B (up line).

I successivi scenari avranno, quindi, come riferimento un ritardo primario di 15 minuti applicato al treno AV in corrispondenza della sezione di blocco critica applicando, di volta in volta, un differente valore del distanziamento medio treno AV – treno AV.

Si riepilogano nella Tab. 2 i dati in uscita dai vari scenari simulati.

#### 4.2 Linea Firenze Rovezzano-Settebagni

Nella direzione dispari si considera la fascia oraria di punta del mattino e si separano i treni secondo i loro distanziamenti medi, mantenendo la stessa struttura d'orario con gli stessi casi di successione.

Considerando il distanziamento minimo  $t_{h,min}$  pari a 4 minuti, sono applicati i seguenti distanziamenti medi  $t_{fm\ orario}$ :

$$\begin{aligned} t_{fm\ orario} (\text{treno AV} - \text{treno AV}) &= 5,5 \text{ minuti;} \\ t_{fm\ orario} (\text{treno AV} - \text{treno RV}) &= 4,5 \text{ minuti;} \\ t_{fm\ orario} (\text{treno RV} - \text{treno AV}) &= 4 \text{ minuti.} \end{aligned}$$

Analogamente a quanto fatto in precedenza, resta da definire in quale sezione di blocco della linea applicare il ritardo primario, in maniera da avere le perturbazioni maggiori.

I tre scenari iniziali sono così costruiti (Tab. 3):

- scenario 1A: il ritardo primario è applicato nell'ultima sezione di blocco della prima tratta Firenze Rovezzano – 1° Bivio Valdarno Nord e rilevante per la successione treno lento – treno veloce;
- scenario 1B: il ritardo primario è applicato nella sezione di blocco critica per la successione dei treni ve-

$$t_{fm\ hourly} (\text{HS train} - \text{HS train}) = 5.5 \text{ minutes;}$$

$$t_{fm\ hourly} (\text{HS train} - \text{FR train}) = 4.5 \text{ minutes;}$$

$$t_{fm\ hourly} (\text{FR train} - \text{HS train}) = 4 \text{ minutes.}$$

Similarly to what was done previously, it must be defined in which block section of the line to apply the primary delay, in order to have the greatest disruptions.

The three initial scenarios are constructed as follows (Tab. 3):

- scenario 1A: the primary delay is applied in the last block section of the first Florence Rovezzano section – 1<sup>st</sup> Valdarno Nord junction and relevant for the slow train – fast train succession;
- scenario 1B: the primary delay is applied in the critical block section for the succession of fast trains considering only the first section Florence Rovezzano - 1<sup>st</sup> Junction Valdarno Nord;
- scenario 1C: the primary delay is applied in the critical block section for the succession of fast trains considering the entire line from Florence Rovezzano to Settebagni.

For the down line, however, the analysis of the three scenarios highlights that:

- in scenario 1A, the delay applied to the FR train affects the subsequent HS trains delaying the departure times from Florence Rovezzano;
- in scenario 1B, the delay applied to the HS train involves the next FR train which, with a lower speed than the HS train, affects the next HS train already leaving Florence Rovezzano. In this way, there are delayed departure times in a chain for all the following trains;

Tabella 2 – Table 2

Riepilogo dati di output delle simulazioni aventi come base iniziale lo scenario 1B (direzione pari)

Summary of output data from simulations with scenario 1B as an initial basis (up line)

Scenario (direzione pari) Scenario (up line)	Intensità del traffico Traffic intensity	Distanziamento medio Average headway	Durata perturbazione Disruption duration	n° treni perturbati no. of disrupted trains	Ritardo medio in arrivo Average delay on arrival	Ritardo totale Total delay	Impegno di capacità Capacity consumption
1B	9,5 treni/h 9.5 trains/h	6,4 minuti 6.4 minutes	83 minuti 83 minutes	6 treni 6 trains	2 minuti 2 minutes	38 minuti 38 minutes	70%
2	10,5 treni/h 10.5 trains/h	5,9 minuti 5.9 minutes	86 minuti 86 minutes	7 treni 7 trains	2,2 minuti 2.2 minutes	46,9 minuti 46.9 minutes	76,7%
3	12 treni/h 12 trains/h	5,1 minuti 5.1 minutes	92 minuti 92 minutes	9 treni 9 trains	2,6 minuti 2.6 minutes	61,9 minuti 61.9 minutes	86,7%
4	14,5 treni/h 14.5 trains/h	4,3 minuti 4.3 minutes	104 minuti 104 minutes	13 treni 13 trains	3,4 minuti 3.4 minutes	98,8 minuti 98.8 minutes	100%
5	8,5 treni/h 8.5 trains/h	7,1 minuti 7.1 minutes	33 minuti 33 minutes	5 treni 5 trains	2 minuti 2 minutes	34 minuti 34 minutes	63,3%

loci considerando soltanto la prima tratta Firenze Rovezzano - 1° Bivio Valdarno Nord;

- scenario 1C: il ritardo primario è applicato nella sezione di blocco critica per la successione dei treni veloci considerando l'intera linea da Firenze Rovezzano a Settebagni.

Per la direzione dispari, invece, l'analisi dei tre scenari pone in rilievo che:

- nello scenario 1A il ritardo applicato al treno RV condiziona i successivi treni AV fino a ritardare gli orari di partenza da Firenze Rovezzano;
- nello scenario 1B il ritardo applicato al treno AV coinvolge il successivo treno RV che, avendo una velocità più bassa rispetto al treno AV, influenza il treno AV successivo già in uscita da Firenze Rovezzano. Si hanno, così, orari di partenza posticipati a catena per tutti i treni che seguono;
- nello scenario 1C il treno RV viene coinvolto dalla perturbazione ma la sua presenza all'interno dell'orario anche qui fa da effetto "scudo" alla propagazione del ritardo.

Si può dedurre come lo scenario più impattante sia lo scenario 1B. I successivi scenari sono studiati in maniera analoga a quanto effettuato per la direzione pari.

Si riepilogano nella Tab. 4 i dati concernenti i vari scenari simulati.

Tabella 3 – Table 3  
Riepilogo scenari iniziali simulati (direzione dispari)  
*Summary of initial simulated scenarios (down line)*

Scenario (direzione dispari) Scenario (down line)	Intensità del traffico Traffic intensity	Distanziamento medio Average headway	Durata perturbazione Disruption duration	n° treni perturbati no. of disrupted trains
1A	11,5 treni/h 11.5 trains/h	5,3 minuti 5.3 minutes	86 minuti 86 minutes	9 treni 9 trains
1B	11,5 treni/h 11.5 trains/h	5,3 minuti 5.3 minutes	92 minuti 92 minutes	9 treni 9 trains
1C	11,5 treni/h 11.5 trains/h	5,3 minuti 5.3 minutes	75 minuti 75 minutes	7 treni 7 trains

- in scenario 1C the FR train is affected by the disruption but its presence within the timetable also acts as a "shield" effect here for the propagation of the delay.

*It can be inferred that the most impactful scenario is scenario 1B. The subsequent scenarios are studied in a similar way to that carried out for the up line.*

*The Tab. 4 data concerning the various simulated scenarios are summarised.*

## 5. Summary and comparison of the results obtained

*The results previously obtained in the simulations of the various scenarios can be related to each other to identify*

Tabella 4 – Table 4  
Riepilogo dati di output delle simulazioni aventi come base iniziale lo scenario 1B (direzione dispari)  
*Summary of output data from simulations with scenario 1B as an initial basis (down line)*

Scenario (direzione dispari) Scenario (down line)	Intensità del traffico Traffic intensity	Distanziamento medio Average headway	Durata perturbazione Disruption duration	n° treni perturbati no. of disrupted trains	Ritardo medio in arrivo Average delay on arrival	Ritardo totale Total delay	Impegno di capacità Capacity consumption
1B	11,5 treni/h 11.5 trains/h	5,3 minuti 5.3 minutes	92 minuti 92 minutes	9 treni 9 trains	2,4 minuti 2.4 minutes	59,4 minuti 59.4 minutes	71,3%
2	13,5 treni/h 13.5 trains/h	4,6 minuti 4.6 minutes	98 minuti 98 minutes	11 treni 11 trains	2,7 minuti 2.7 minutes	86,1 minuti 86.1 minutes	83,8%
3	15,5 treni/h 15.5 trains/h	3,9 minuti 3.9 minutes	137 minuti 137 minutes	23 treni 23 trains	4,7 minuti 4.7 minutes	190,5 minuti 190.5 minutes	97,1%
4	10,5 treni/h 10.5 trains/h	5,7 minuti 5.7 minutes	82 minuti 82 minutes	6 treni 6 trains	2 minuti 2 minutes	42,1 minuti 42.1 minutes	64,6%

## 5. Sintesi e confronto dei risultati ottenuti

I risultati precedentemente ottenuti nelle simulazioni dei vari scenari possono essere messi in relazione fra di loro per individuare gli aspetti che influenzano maggiormente il fenomeno della propagazione del ritardo sulla circolazione ferroviaria, nella direzione pari e nella direzione dispari della linea oggetto di studio.

Con riferimento alla simulazione dell'orientamento pari, da Settebagni a Firenze Rovezzano, si può notare che la durata della perturbazione assume un andamento a due livelli: partendo da destra verso sinistra si osserva nel primo tratto una crescita rapida al diminuire del distanziamento medio, ovvero all'aumentare del numero di treni che circolano in un'ora sulla linea; tale andamento si stabilizza in prossimità delle condizioni pari all'orario programmato (equivalente a un distanziamento medio di circa 6,4 minuti ed indicato nei grafici seguenti mediante un simbolo di colore rosso), per poi incrementarsi nel secondo tratto in maniera più lenta rispetto a prima. Ciò è sintomo del fatto che nell'orario considerato si raggiunge una condizione critica prossima alla congestione, con un decadimento rapido del livello di servizio in presenza di un ritardo primario.

La Fig. 13 descrive tale relazione fra queste due variabili.

Nella Fig. 14, invece, l'approccio simulativo mostra un andamento proporzionale tra l'inverso del numero di treni circolanti sulla linea e il numero dei treni coinvolti dalla perturbazione. Confrontando tale curva con quella ottenuta mediante la metodologia analitica "Landex", precedentemente illustrata, e relativa ad un ritardo primario pari a 15 minuti, si evidenzia, invece, un vistoso decadimento delle prestazioni del sistema ferroviario a partire da un distanziamento medio pari a 5 minuti. Analoga considerazione può essere tratta visualizzando su tale grafico anche l'andamento della lunghezza della coda, infatti, come suggerisce il metodo UIC 405, oltre il valore di  $\rho$  corrispondente a 0,75 essa cresce asintoticamente in corrispondenza del distanziamento minimo. Si può, inoltre, notare che il metodo "Landex" e l'approccio simulativo sembrano fornire stime simili per valori del distanziamento medio superiori a 6 minuti e corrispondenti ad un indice di  $\rho$  inferiore a 0,7; mentre l'approccio analitico basato sulla teoria delle code, rispetto ad essi, sembra sottostimare il numero dei treni perturbati fino a che non si arriva al distanziamento minimo, laddove tale curva tende a ricongiungersi a quella definita mediante l'approccio "Landex". In ogni caso, per valori di  $\rho$  superiori a 0,75

fy the aspects that most influence the phenomenon of the propagation of the delay on railway traffic, in the up line and in the down line of the line case study.

With reference to the simulation of the up line, from Settebagni to Firenze Rovezzano, it can be observed that the duration of the disruption takes on a two-level trend: starting from right to left, rapid growth is observed in the first section as the average headway decreases, i.e. as the number of trains that circulate on the line in one hour increases; this trend stabilises near the conditions equal to the scheduled time (equivalent to an average headway of about 6.4 minutes and indicated in the following graphs by a red symbol), and then increases in the second section more slowly than before. This is a symptom of the fact that a critical condition close to congestion is reached during the time in question, with a rapid decline in the level of service in the presence of a primary delay.

Fig. 13 describes the relationship between these two variables.

In Fig. 14, however, the simulation approach shows a proportional trend between the inverse of the number of trains circulating on the line and the number of trains involved in the disruption. Comparing this curve with that obtained using the "Landex" analytical methodology, previously illustrated, and relating to a primary delay of 15 minutes, we can see, however, a conspicuous decline in the performance of the railway system starting from an average headway of 5 minutes. A similar consideration can be made by visualising on this graph also the trend of the length of the queue, in fact, as suggested by the UIC 405 method, beyond the value of  $\rho$  corresponding to 0.75 it

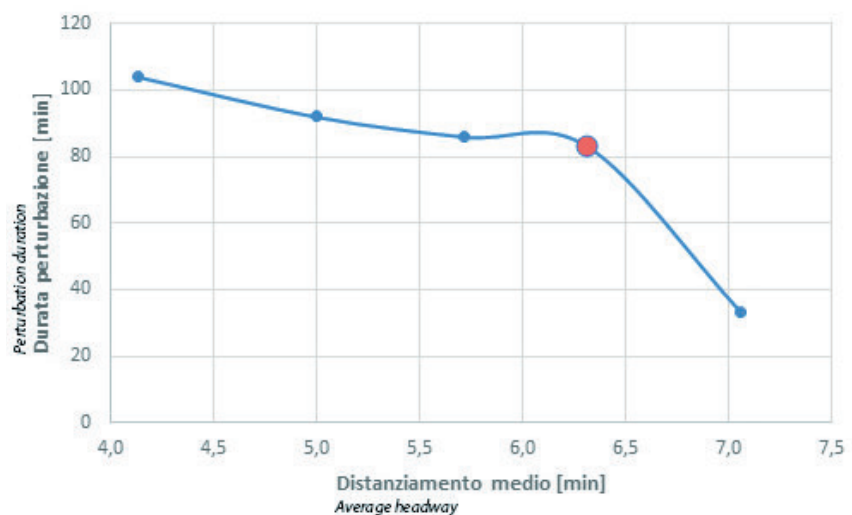


Figura 13 – Relazione fra il distanziamento medio e la durata della perturbazione (orientamento pari).

Figure 13 – Relationship between the average headway and the perturbation duration (up line).



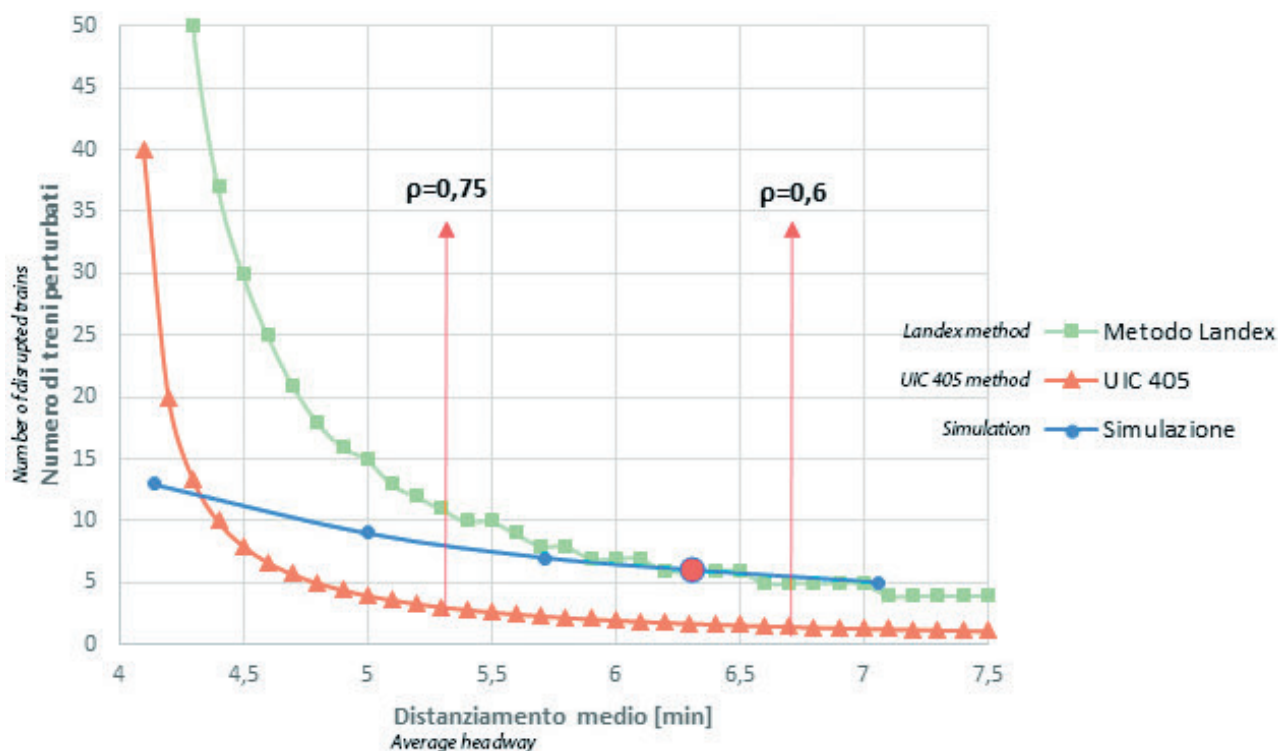


Figura 14 – Confronto fra le varie metodologie degli output sul numero di treni perturbati in relazione al distanziamento medio (orientamento pari).

Figure 14 – Comparison between the various methodologies of the outputs on the number of disrupted trains in relation to the average headway (up line).

la metodologia simulativa rimane più stabile rispetto alle due metodologie analitiche.

Un andamento simile può essere descritto nel mettere in relazione il ritardo totale con il distanziamento medio. Si nota, infatti, che l'approccio simulativo restituisce una crescita del ritardo totale prettamente lineare in presenza di un orario sempre più denso a partire dalle condizioni iniziali. Questo andamento è in forte contrasto con quanto emerge dalle metodologie analitiche come riportato nella Fig. 15. Ciò sottolinea l'importanza della scelta di un modello rispetto ad un altro con le relative ipotesi di assunzione al fine di ottenere dei risultati che siano plausibili.

Infine, risulta interessante osservare cosa succede al variare del distanziamento medio fra i treni in termini di variazioni percentuali dell'impegno di capacità, della durata della perturbazione e del ritardo totale con riferimento ai risultati ottenuti dalle simulazioni.

La Fig. 16 mostra, infatti, che ad un aumento dell'impegno di capacità, fino alla saturazione completa, rispetto allo *status quo*, indicato da un pallino di colore rosso, si ha un incremento più che proporzionale della durata della perturbazione e del ritardo totale. Mentre ad un decremento di circa 7 punti percentuali dell'impegno di capacità, rispetto allo *status quo*, si ha una riduzione margi-

grows asymptotically in correspondence with the minimum headway. It can also be noted that the "Landex" method and the simulation approach seem to provide similar estimates for values of the average headway greater than 6 minutes and corresponding to an index of  $\rho$  less than 0.7; while the analytical approach based on queue theory, compared to them, seems to underestimate the number of trains perturbed until the minimum headway is reached, where this curve tends to re-join the one defined by the "Landex" approach. In any case, for values of  $\rho$  greater than 0.75, the simulation method remains more stable than the two analytical methods.

A similar trend can be described in relating the total delay to the average headway. It is observed, in fact, that the simulation approach returns a purely linear growth of the total delay in the presence of an increasingly dense timetable starting from the initial conditions. This trend is in stark contrast to what emerges from the analytical methodologies as reported in Fig. 15. This underlines the importance of choosing one model over another with the related assumptions in order to obtain plausible results.

Lastly, it is interesting to observe what happens when the average headway between trains varies in terms of percentage variations of the capacity consumption, the dura-

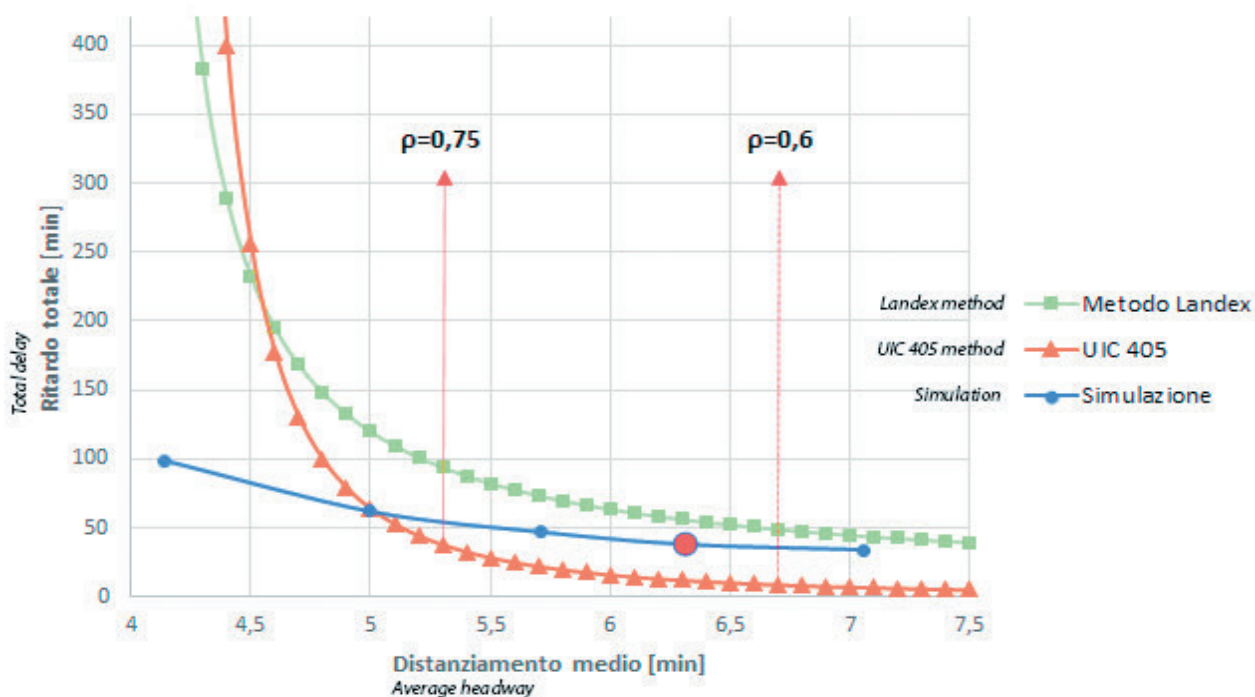


Figura 15 – Confronto fra le varie metodologie degli output sul ritardo totale come funzione del distanziamento medio (orientamento pari).

Figure 15 – Comparison between the various methodologies of the outputs on the total delay as a function of the average headway (up line).

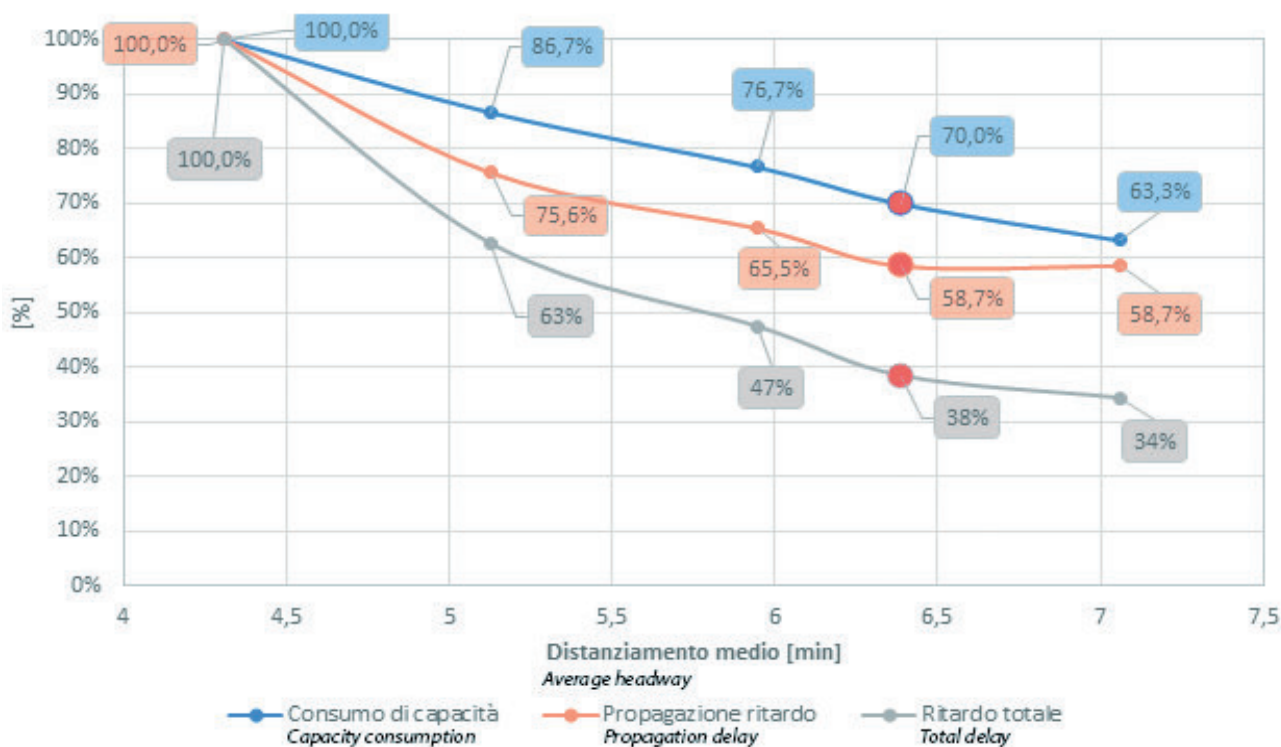


Figura 16 – Variazioni percentuali con il distanziamento medio (orientamento pari).

Figure 16 – Percentage changes with average headway (up line).

nale sia della propagazione del ritardo che del ritardo complessivo.

Con riferimento, invece, alla simulazione dell'orientamento dispari, da Firenze Rovezzano a Settebagni, si possono tracciare gli stessi grafici ottenuti per la direzione pari.

Si può notare che la durata della perturbazione tende a rimanere costante nell'intorno delle condizioni corrispondenti all'orario di base, per poi raggiungere un incremento cospicuo al superamento della soglia di 13,5 treni/h, equivalente ad un distanziamento medio tra i treni pari a 4,5 minuti. Anche in questo caso, come per la direzione pari, si può constatare di essere in uno stato limite per la circolazione dei treni.

La Fig. 17 riporta la relazione appena descritta.

Nella Fig. 18, invece, la simulazione profila il numero dei treni coinvolti dalla perturbazione su una curva a "gradino" con una divergenza più marcata rispetto alle curve definite dalle metodologie analitiche che, come già visto per la direzione pari, anche qui assumono una tendenza di tipo esponenziale negativa con una sottostima per il metodo UIC 405 e una sovrastima per il metodo "Landex". Ancora una volta, l'approccio simulativo per valori di  $\rho$  maggiori di 0,75 si mantiene più stabile, a differenza dei metodi analitici che in tale regione assumono un comportamento asintotico in prossimità del distanziamento minimo.

Mettendo in relazione il ritardo totale con il distanziamento medio si nota per l'approccio simulativo una crescita lineare a tratti in presenza di un orario sempre più

tion of the disruption and the total delay with reference to the results obtained from the simulations.

Fig. 16 shows, in fact, that with an increase in the capacity consumption, up to complete saturation, compared to the status quo, indicated by a red dot, there is a more than proportional increase in the duration of the disruption and in the total delay. While with a decrease of about 7 percentage points in the capacity consumption, compared to the status quo, there is a marginal reduction in both the propagation of the delay and the overall delay.

With reference, instead, to the simulation of the down line, from Florence Rovezzano to Settebagni, the same graphs obtained for the up line can be drawn.

It can be observed that the duration of the disruption tends to remain constant around the conditions corresponding to the basic timetable, to then reach a conspicuous increase when the threshold of 13.5 trains/h is exceeded, equivalent to an average headway of 4.5 minutes. Also in this case, as for the up line, it can be ascertained to be in a limit condition for train circulation.

Fig. 17 shows the relationship just described.

In Fig. 18, on the other hand, the simulation profiles the number of trains involved in the disruption on a "step" curve with a more marked divergence compared to the curves defined by the analytical methodologies which, as already seen for the up line, also assume here a type of negative exponential trend with an underestimation for the

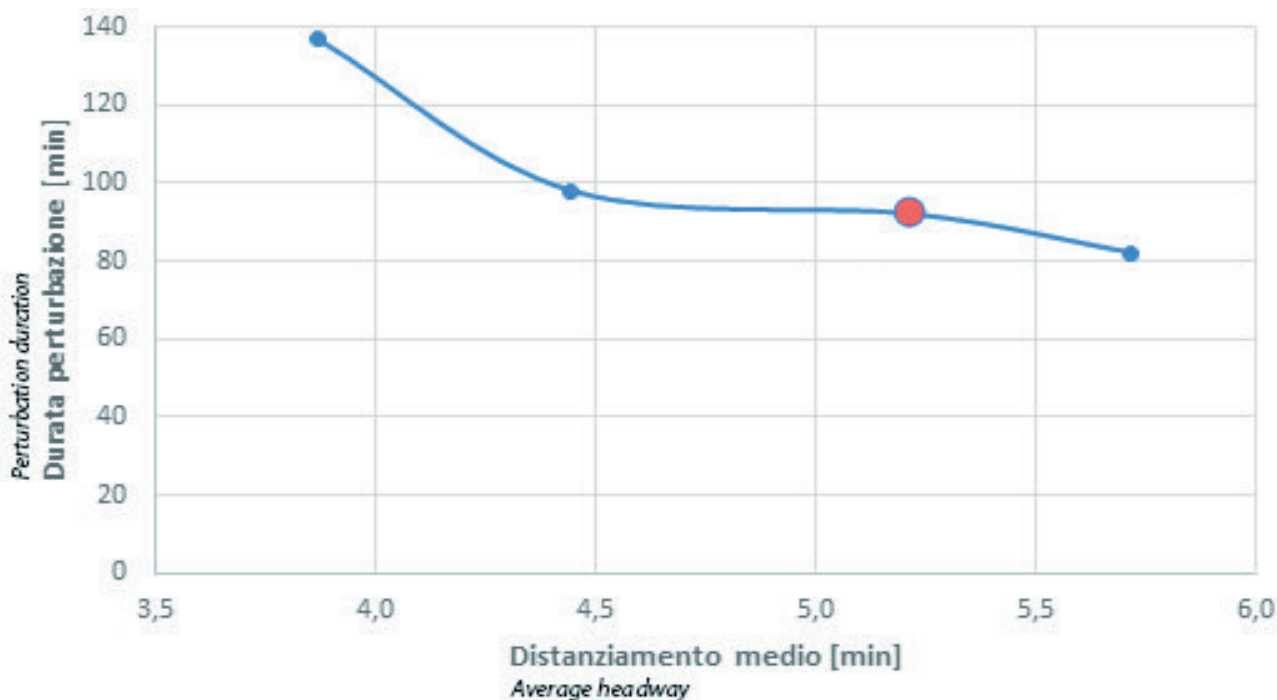


Figura 17 – Relazione fra il distanziamento medio e la durata della perturbazione (orientamento dispari).

Figure 17 – Relationship between the average headway and the perturbation duration (down line).

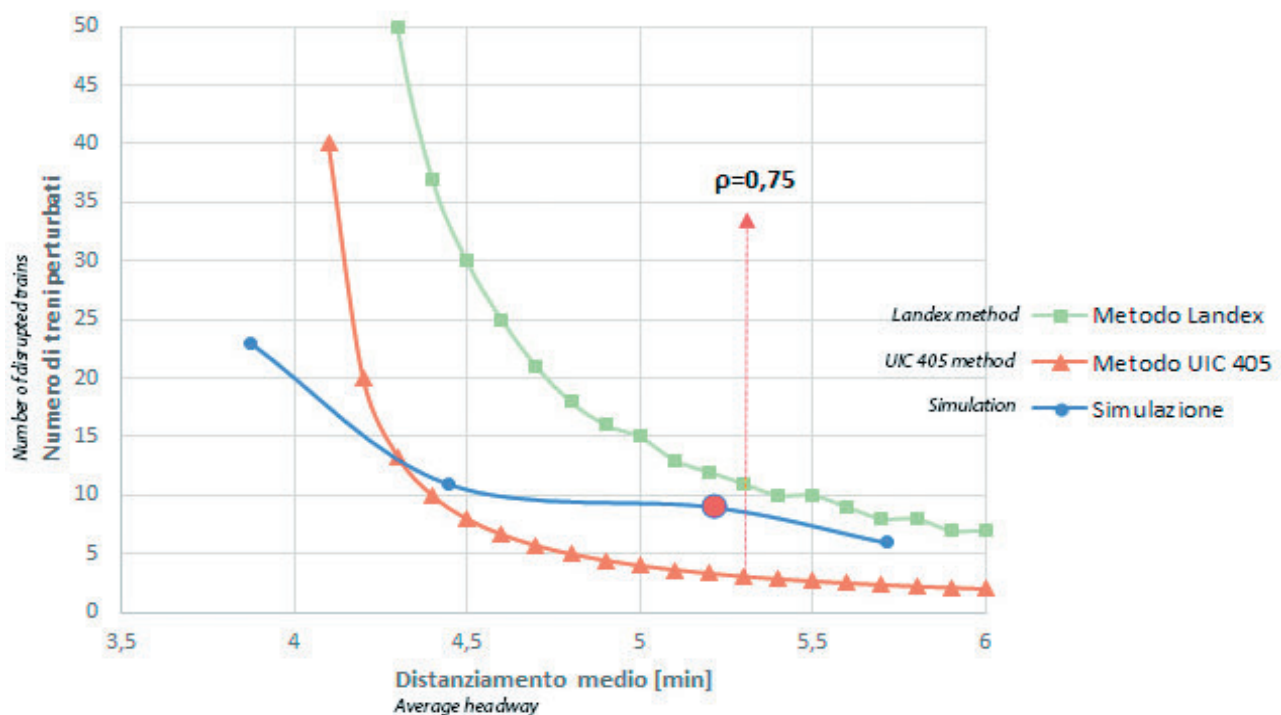


Figura 18 – Confronto fra le varie metodologie degli output sul numero di treni perturbati in relazione al distanziamento medio (orientamento dispari).

Figure 18 – Comparison between the various methodologies of the outputs on the number of disrupted trains in relation to the average headway (down line).

denso a partire dalle condizioni iniziali. Le metodologie analitiche, anche qui, mostrano un andamento più severo del ritardo totale, come riportato nella Fig. 19.

Infine, analogamente a quanto delineato per la direzione pari, si può osservare anche nella direzione dispari cosa succede al variare del distanziamento medio fra i treni in termini di variazioni percentuali dell'impegno di capacità, della durata della perturbazione e del ritardo totale.

La Fig. 20 mostra, infatti, che ad un aumento dell'impegno di capacità, rispetto allo *status quo*, rappresentato da un indicatore rotondo in rosso, si ha un incremento a tendenza esponenziale della durata della perturbazione e del ritardo totale. Mentre ad una riduzione dell'impegno di capacità di circa 7 punti percentuali rispetto allo *status quo*, si ha una tendenza lineare sia della propagazione del ritardo che del ritardo complessivo.

Tali variazioni percentuali, se confrontate con il grafico analogo per la direzione pari, sono più cospicue ed evidenziano maggiori margini di miglioramento nella direzione dispari, nell'ipotesi di modifiche future nell'orario di servizio. Inoltre, la minore distanza percorsa in condizioni di promiscuità dei treni veloci e lenti nella tratta che va da Firenze Rovezzano a 1° Bivio Valdarno Nord, rispetto alla tratta, in direzione pari, che va da Settebagni a 1° Bivio Orte Sud conduce ad una risposta del sistema ferroviario leggermente difforme nelle due direzioni.

UIC 405 method and an overestimation for the "Landex" method. Once again, the simulation approach for values of  $\rho$  greater than 0.75 remains more stable, unlike the analytical methods which in this region assume an asymptotic behaviour near the minimum headway.

By relating the total delay with the average headway, we can observe a linear growth at times for the simulation approach in the presence of an increasingly dense timetable starting from the initial conditions. Here too, the analytical methodologies show a more severe trend of the total delay, as reported in Figure 19.

Finally, similarly to what has been outlined for the up line, what happens when the average headway varies in terms of percentage variations of the capacity consumption, the duration of the disruption and the total delay can also be observed in the down line.

Fig. 20 shows, in fact, that with an increase in the capacity consumption, compared to the status quo, represented by a round indicator in red, there is an exponential increase in the duration of the disruption and in the total delay. While with a reduction in capacity consumption of about 7 percentage points compared to the status quo, there is a linear trend in both the propagation of the delay and the overall delay.

If compared with the analogous graph for the up line, these percentage variations are more conspicuous and



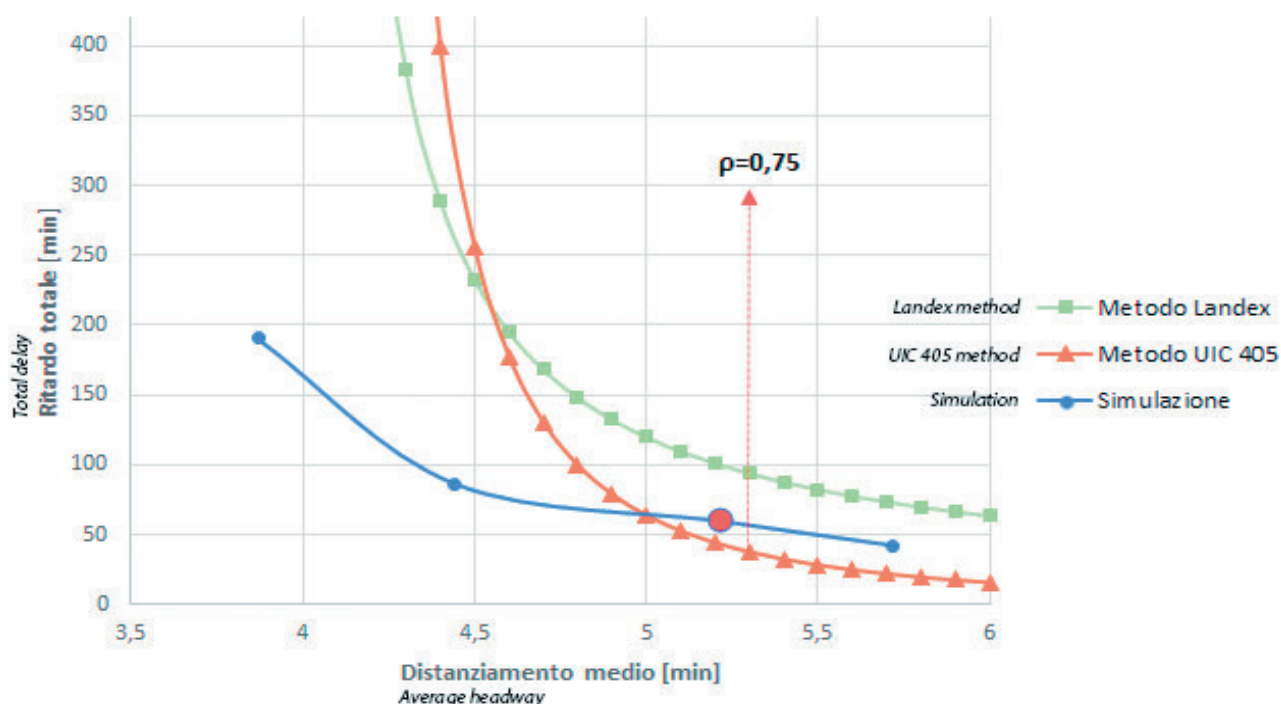


Figura 19 – Confronto fra le varie metodologie degli output sul ritardo totale come funzione del distanziamento medio (orientamento dispari).

Figure 19 – Comparison between the various methodologies of the outputs on the total delay as a function of the average headway (down line).

Riepilogando, si può constatare in tutti i casi come le metodologie analitiche tendano ad avere un andamento asintotico per valori sempre più prossimi al distanziamento minimo ammissibile dalla linea, quest'ultimo già determinato in un precedente lavoro [7].

Il forte scostamento che si può rilevare in quest'area del grafico tra le curve "analitiche" e la curva derivante dalla simulazione potrebbe essere imputato all'impostazione rigidamente omotachica della metodologia analitica "Landex" e, con riferimento anche all'approccio derivante dal metodo UIC 405, alla presenza di formule semplici che non richiedono una grande quantità di dati rispetto all'alto livello di dettaglio richiesto dalla simulazione.

Esse, di fatto, non prendono in considerazione l'eventuale presenza di tracce lente inserite all'interno di una batteria di treni veloci, situazione differente da un grafico costituito da sole tracce parallele fra di loro ovvero aventi la stessa velocità. Nel primo caso, infatti, il numero di treni perturbati e la quota totale del ritardo dipendono dalla posizione nella quale avviene il ritardo e dalla tipologia del primo treno impattato; l'ampio *buffer* virtuale che si verrebbe a creare in un orario costruito con una coppia di tracce veloci inframezzata da una traccia lenta che percorre soltanto le tratte estreme della linea sembra, apparentemente, limitare gli effetti del ritardo primario; ciò si tradurrebbe però, a parità di impegno di capacità,

show greater room for improvement in the down line, in the hypothesis of future changes in the service timetable. Furthermore, the shorter distance travelled in promiscuity conditions of fast and slow trains in the section that goes from Florence Rovezzano to the 1<sup>st</sup> Junction Valdarno Nord, compared to the section, in the up line, which goes from Settebagni to the 1<sup>st</sup> Junction Orte Sud leads to a slightly different response of the railway system in both directions.

In summary, it can be seen in all cases how the analytical methodologies tend to have an asymptotic trend for values increasingly close to the minimum admissible headway from the line, the latter already determined in a previous work [7].

The strong deviation that can be detected in this area of the graph between the "analytical" curves and the curve deriving from the simulation could be attributed to the rigidly homotachic approach of the "Landex" analytical methodology and, with reference also to the approach deriving from the UIC 405 method, in the presence of simple formulas that do not require a large amount of data compared to the high level of detail required by the simulation.

In fact, they do not take into consideration the possible presence of slow paths inserted inside an array of fast trains, a situation different from a graph consisting only of paths parallel to each other or with the same speed. In the first case, in fact, the number of disrupted trains and the

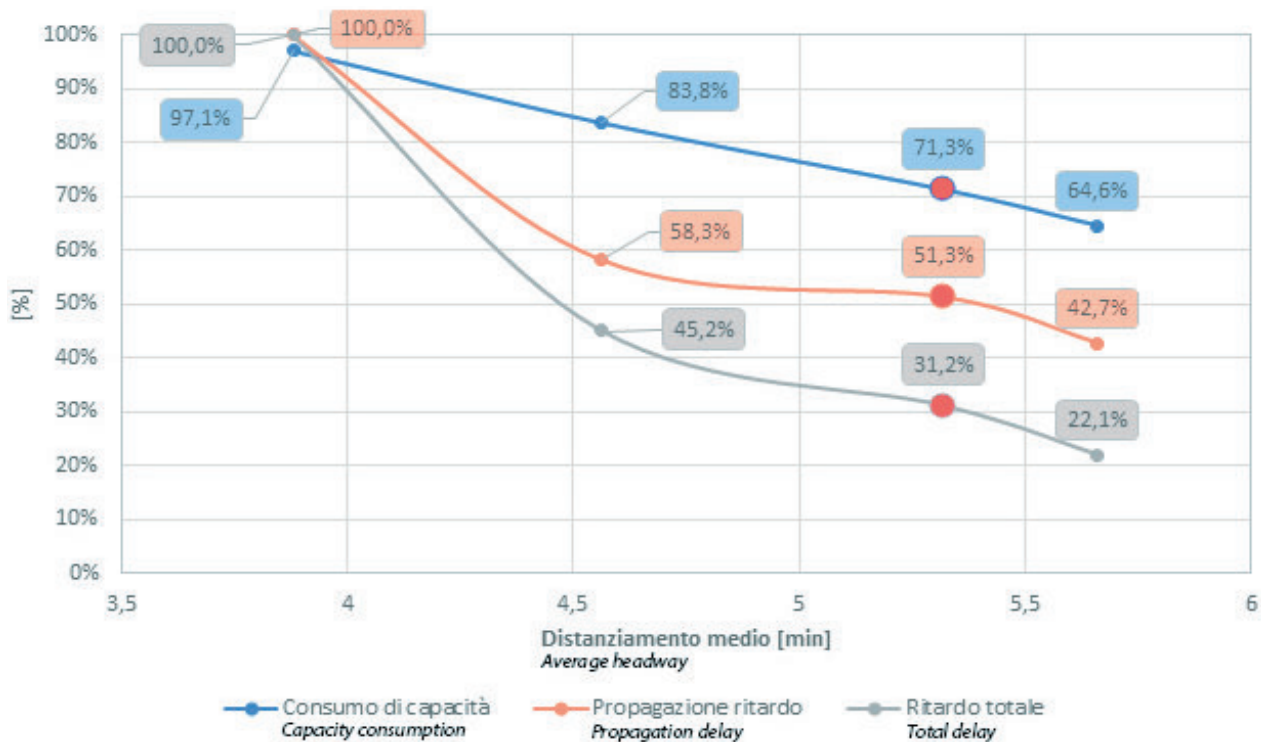


Figura 20 – Variazioni percentuali con il distanziamento medio (orientamento dispari).  
 Figure 20 – Percentage changes with average headway (down line).

in una quantità minore di treni circolanti rispetto al caso di un traffico omotachico.

Il rischio di generare ritardi consecutivi è, comunque, più alto alle estremità delle sezioni di linea e in presenza di ridotti tempi cuscinetto.

Tuttavia, occorre considerare che nella gestione della circolazione in tempo reale in condizioni di perturbazione, soprattutto in aree congestionate, sono richieste frequenti modifiche che potrebbero non essere rappresentate esaurientemente dai software di simulazione [32]; ad esempio, una delle possibili soluzioni adottate potrebbe essere, infatti, quella di inoltrare il treno lento su una linea affiancata oppure sopprimere direttamente il servizio commerciale nei casi più critici al fine di ripristinare il prima possibile lo stato di “quiete” originario [12] [33][34].

Si tratta, in definitiva, di un approccio simulativo che può essere riscontrato anche in altri autori [4][14][24] [26][27][28][29][35][36] il quale permette di valutare l'impatto di differenti scelte in fase di progettazione dell'orario e, eventualmente, di modifiche infrastrutturali.

## 6. Conclusioni

La delicata relazione tra l'impegno di capacità e la regolarità di una linea ferroviaria è un aspetto che si può cercare di stimare con un buon grado di approssimazione durante la fase di progettazione dell'orario di servizio.

*total share of the delay depend on the position in which the delay occurs and on the type of the first impacted train; the large virtual buffer that would be created in a timetable constructed with a pair of fast train paths interspersed with a slow track that only runs along the extreme sections of the line apparently seems to limit the effects of the primary delay; however, with the same capacity consumption, this would result in a smaller number of trains circulating than in the case of homotachic traffic.*

*The risk of generating consecutive delays is, however, higher at the ends of the line sections and in the presence of reduced buffer times.*

*However, it must be considered that in the management of traffic in real time in conditions of disruption, especially in congested areas, frequent changes are required which may not be fully represented by the simulation software [32]; for example, one of the possible solutions adopted could be, in fact, to forward the slow train on a side-by-side line or directly cancel the commercial service in the most critical cases in order to restore the original “quiet” condition as soon as possible [12][33][34].*

*Ultimately, it is a simulation approach that can also be found in other authors [4][14][24][26][27][28][29][35] [36] which allows evaluating the impact of different choices in the planning phase of the timetable and, possibly, of infrastructural changes.*

Le metodologie analitiche, tuttavia, si rivelano sensibili e poco accurate nella descrizione dei fenomeni caratterizzati da condizioni al contorno estremamente critiche. Tali modelli non sono in grado di cogliere tutti gli aspetti dei servizi commerciali presenti su una data linea e si basano su situazioni ideali e ipotesi iniziali rigide per la stima dei ritardi causati da un'anormalità assumendo, così, una minore affidabilità come strumento di previsione.

Si può, infatti, constatare come per valori del distanziamento programmato prossimi a quello minimo, il modello analitico si discosta fortemente dall'approccio simulativo in quanto si considerano condizioni di traffico differenti.

Invece, gli approcci simulativi, nonostante necessitino di un'elevata accuratezza dei dati in ingresso, possono riprodurre con maggiore fedeltà le dinamiche che caratterizzano la circolazione ferroviaria. La simulazione di differenti scenari mediante il software OpenTrack® permette di approfondire le variabili che governano la propagazione dei ritardi ed esplorare tutti i campi possibili ai fini della costruzione di un orario robusto dei servizi cercando di utilizzare al meglio la capacità a disposizione.

A differenza di quanto emerso nel precedente lavoro, dove si riscontrava una buona convergenza dei risultati tra le metodologie analitiche e gli approcci simulativi per la determinazione della capacità della linea DD [7], in questo studio le due tecniche presentano una forte divergenza ed una difficile complementarità e confrontabilità dei risultati.

La simulazione, in tal senso, rileva come ad un sempre più crescente impegno di capacità della linea corrispondano maggiori ritardi e come sia influente il modello di esercizio adottato sulla possibilità di assorbire ritardi primari di lieve entità. Nel caso di studio, a causa dell'elevato livello di saturazione, si ha una presenza di ridotti tempi cuscinetto tra le tracce orarie rendendo minori le possibilità di recupero del ritardo. Una crescita marginale del distanziamento offrirebbe miglioramenti sul livello di regolarità ma ciò si tradurrebbe in una minore quantità dell'offerta di trasporto a parità di sistema di segnalamento. Una possibile applicazione futura potrebbe essere, pertanto, quella di analizzare attraverso la simulazione una stessa configurazione d'orario con diversi sistemi di segnalamento per valutare le differenti risposte in condizioni di perturbazione e, soprattutto nel caso di studio, misurare i benefici derivanti dall'adozione del sistema ETCS L2, attualmente in corso di installazione da fine 2020 [37].

In conclusione, diventa fondamentale individuare, anche attraverso l'utilizzo di un modello di simulazione robusto e realistico, il miglior *trade-off* tra il distanziamento medio fra i treni e l'affidabilità del sistema al crescere del livello di saturazione dell'infrastruttura al fine di supportare un'attenta pianificazione dell'orario nelle sue numerose possibilità di realizzazione per soddisfare la domanda di trasporto e minimizzare i ritardi in fase di gestione del traffico.

## 6. Conclusions

*The delicate relationship between the capacity consumption and the regularity of a railway line is an aspect that one can try estimating with a good degree of approximation during the planning phase of the service timetable.*

*The analytical methodologies, however, prove to be sensitive and not very accurate in the description of phenomena characterised by extremely critical boundary conditions. These models are unable to capture all the aspects of commercial services present on a given line and are based on ideal situations and rigid initial hypotheses for the estimation of delays caused by an abnormality, thus assuming a lower reliability as forecasting tool.*

*It can, in fact, be observed that for values of the planned headway close to the minimum, the analytical model differs greatly from the simulation approach in that different traffic conditions are considered.*

*On the other hand, despite requiring high accuracy of the input data, simulation approaches can reproduce the dynamics that characterise railway traffic with greater accuracy. The simulation of different scenarios using the OpenTrack® software allows investigating the variables that discipline the propagation of delays and exploring all possible fields for the purpose of building a robust service timetable, trying to make the best use of the available capacity.*

*Unlike what emerged in the previous work, where there was a good convergence of the results between the analytical methodologies and the simulative approaches for determining the capacity of the DD line [7], in this study the two techniques show a strong divergence and a difficult complementarity and comparability of results.*

*The simulation, in this sense, shows how greater delays correspond to an ever-increasing capacity consumption of the line and how the operating model adopted is influencing on the possibility of absorbing primary delays of a minor entity. In the case study, there are reduced buffer times between the train paths, due to the high level of saturation, decreasing the chances of recovering the delay. A marginal increase in the headway would offer improvements on the level of regularity but this would translate into a smaller quantity of the transport offer with the same signalling system. A possible future application could therefore be to analyse the same timetable configuration through simulation with different signalling systems to evaluate the different responses in conditions of disruption and, especially in the case study, to measure the benefits deriving from the adoption of the ETCS L2 system, currently being installed since the end of 2020 [37].*

*In conclusion, it becomes essential to identify the best trade-off between the average headway between trains and the reliability of the system, also using a robust and realistic simulation model, as the level of infrastructure saturation increases in order to support careful planning of the timetable in its numerous possibilities of realisation to satisfy the transport demand and minimise delays in the traffic management phase.*

## BIBLIOGRAFIA - REFERENCES

- [1] GOVERDE R.M.P. (2005), "*Punctuality of railway operations and timetable stability analysis*", Tesi di Dottorato, Delft University of Technology, Delft, Paesi Bassi.
- [2] VROMANS M.J.C.M. (2005), "*Reliability of railway systems*", Tesi di Dottorato, Erasmus Universiteit Rotterdam, Rotterdam, Paesi Bassi.
- [3] STOK R. (2008), "*Estimation of railway capacity consumption using stochastic differential equations*", Tesi di Dottorato, Università degli Studi di Trieste.
- [4] MEDEOSSI G. (2010), "*Capacity and reliability on railway networks: a simulative approach*", Tesi di Dottorato, Università degli Studi di Trieste.
- [5] BEDIRU K. (2012), "*Simulation for rail infrastructure capacity determination*", Tesi di Laurea Magistrale, KTH Royal Institute of Technology, Stoccolma, Svezia.
- [6] RIETVELD P., BRUINSMA F.R., VAN VUUREN D.J. (2001), "*Coping with unreliability in public transport chains: a case study for the Netherlands*", in "Transportation Research Part A", Volume 35, pp. 539-559.
- [7] PRENCIPE F.P., PETRELLI M. (2018), "Metodologie analitiche e approcci simulativi per la determinazione della capacità della linea "Direttissima" Roma-Firenze", in "Ingegneria Ferroviaria", a. LXXIII, n. 7-8, Luglio-Agosto.
- [8] SCHWANHÄUSSER W. (1974), "*Die Bemessung der Pufferzeiten im Fahrplangefüge der Eisenbahn*", Tesi di dottorato, RWTH Aachen University, Aachen, Germania.
- [9] PACHL J. (2002), "*Railway Operation and Control*", VTD Rail Publishing, Mountlake Terrace, WA, Stati Uniti.
- [10] PACHL J., WHITE T. (2004), "*Analytical capacity management with blocking times*", Transportation Research Board - 83rd Annual Meeting, Washington, DC, Stati Uniti.
- [11] HANSEN I.A., PACHL J. (2014), "*Railway Timetabling & Operations*", Eurailpress, Amburgo, Germania.
- [12] LANDEX A. (2008), "*Methods to estimate railway capacity and passenger delays*", Tesi di Dottorato, Technical University of Denmark, Copenhagen, Danimarca.
- [13] ACCATTATIS F. (1992), "La propagazione delle perturbazioni nella circolazione omotachica", in "Ingegneria Ferroviaria", a. XLVII, n. 5, Maggio.
- [14] MORAGLIA F., POCETTI F. (2012), "Blocco fisso e blocco mobile: analisi della capacità e della propagazione dei ritardi", Tesi di Laurea Magistrale, Scuola di Ingegneria Civile, Ambientale e Territoriale, Politecnico di Milano.
- [15] YUAN J. (2006), "*Stochastic modelling of train delays and delay propagation in stations*", TRAIL Research School, Delft, Paesi Bassi.
- [16] YUAN J. (2008), "*Statistical analysis of train delays*", in "Railway Timetable & Traffic", Eurailpress, Amburgo, Germania, pp. 170-181.
- [17] WENDLER E. (2008), "*Queuing*", in "Railway Timetable & Traffic", Eurailpress, Amburgo, Germania, pp. 106-117.
- [18] POTTHOFF G. (1962), "*Verkehrsströmungslehre I - Die zugfolge auf Strecken und in Bahnhöfen*", Transpress, Berlino, Germania.
- [19] SKARTSÆTERHAGEN S. (1993), "*Capacity of railway lines*", Institute for Energy Technology, Kjeller, Norvegia.
- [20] LANDEX A., KAAS A.H., HANSEN S. (2006), "*Railway Operation*", Centre for Traffic and Transport, Technical University of Denmark, Copenhagen, Danimarca.
- [21] KAAS A.H. (1998), "*Methods to calculate capacity of railway*", Tesi di Dottorato, Technical University of Denmark, Copenhagen, Danimarca.
- [22] UIC Leaflet 406 (2013), "*Capacity*", International Union of Railways, 2<sup>a</sup> ed.
- [23] DI MARCO G., MALAVASI G., RICCI S. (2000), "Affidabilità dei sistemi ferroviari. Analisi e valutazione mediante modelli di simulazione", in "Ingegneria Ferroviaria", a. LV, n. 1-2, Gennaio-Febbraio.
- [24] RICCI S., ACCATTATIS F.M., ANTIGNOLI M., BALDASSARRA A., BRUNER M., CAPPELLI A., COSCIOTTI E., D'OVIDIO G., LIBARDO A., MALAVASI M., TIERI A. (2013), "Ingegneria dei sistemi ferroviari - Tecnologie, metodi ed Applicazioni", Volume Collana Ingegneria dei Trasporti, EGAF Edizioni, Forlì.
- [25] HUERLIMANN D., NASH A.B. (2004), "*Railroad simulation using OpenTrack*", Institute for Transport Planning and Systems, ETH Zurich, Zurigo, Svizzera.



- [26] DICEMBRE A. (2011), “Studio della circolazione in linee e nodi complessi: l’esercizio dei corridoi ferroviari urbani”, Tesi di Dottorato, Sapienza - Università di Roma.
- [27] FIALHO J.P.P. (2013), “*Simulation for railway capacity determination*”, Tesi di Laurea Magistrale, Instituto Superior Técnico, Lisbona, Portogallo.
- [28] LINDFELDT A. (2015), “*Railway capacity analysis - Methods for simulation and evaluation of timetables, delays and infrastructure*”, Tesi di Dottorato, KTH Royal Institute of Technology, Stoccolma, Svezia.
- [29] KAAS A.H. (2000), “*Punctuality model for railways*”, in “Computers in Railways VII”, Volume 50, pp. 853-860.
- [30] CIRILLO B., COMASTRI L.C., GUIDA P.L., VENTIMIGLIA A. (2009), “L’alta velocità ferroviaria”, CIFI, Roma.
- [31] RICCI S. (2014), “*Punctuality based calibration of railway capacity models*”, in “Proceedings of the Second International Conference on Railway Technology: Research, Development and Maintenance”, Civil-Comp Press, Stirling-shire, Regno Unito.
- [32] D’ARIANO A. (2008), “*Improving real-time train dispatching: models, algorithms and applications*”. TRAIL, Delft.
- [33] JABCOBS J. (2008), “*Rescheduling*”, in “Railway Timetable & Traffic”, Eurail Press, Amburgo, Germania.
- [34] JESPERSEN-GROTH *et al.* (2007), “*Disruption management in passenger railway transportation*”, Technical University of Denmark, Kongens Lyngby, Danimarca.
- [35] RICCI S., TIERI A. (2009), “Verifica e previsione della regolarità del traffico ferroviario con un modello di simulazione basato sulle Reti di Petri”, in “Ingegneria Ferroviaria”, a. LXIV, n. 9, Settembre.
- [36] COVIELLO N., DALLA CHIARA B., RICCI S. (2015), “Generazione automatica di orari ed applicazioni di algoritmi di programmazione per lo studio di capacità e perturbazioni di linee ferroviarie”, in “Ingegneria Ferroviaria”, a. LXX, n. 10, Ottobre.
- [37] Ferrovie dello Stato Italiane (2020), <[fsitaliane.it/content/fsitaliane/it/media/comunicati-stampa/2020/12/28/rfi-attiva-prima-tratta-ertms-sulla-direttissima-firenze—roma.html](https://www.fsitaliane.it/content/fsitaliane/it/media/comunicati-stampa/2020/12/28/rfi-attiva-prima-tratta-ertms-sulla-direttissima-firenze—roma.html)>.
- [38] DE RIVERA A.D., DICK C.T. (2021), “*Illustrating the implications of moving blocks on railway traffic flow behavior with fundamental diagrams*”, in “Transportation Research Part C”, Volume 123.