



## Le specifiche di distanziamento: il legame tra tecnologia e orario

### *Design of railway headway: the relationship between technology and timetable*

Dott. Ing. Emmanuele VAGHI<sup>(\*)</sup>

#### 1. Introduzione

L'intensificazione delle frequenze dei servizi e l'aumentata richiesta di tracce, anche da parte di operatori in concorrenza tra loro, fanno sì che sui segmenti importanti della rete ferroviaria e nei nodi le infrastrutture siano chiamate ad accogliere un numero di treni nell'unità di tempo maggiore di quanto sia stato necessario in passato, in parallelo ad una richiesta di aumento della stabilità dei sistemi rispetto alla puntualità.

Gli investimenti strutturali, caratterizzati da un costo finanziario ed ambientale elevato e da tempi di attuazione lunghi, non possono essere ovunque la risposta alle esigenze. È quindi necessario sottoporre ad analisi le modalità di utilizzo dell'infrastruttura e di impostazione dei servizi, per individuare i casi dove maggiori prestazioni possano essere ottenute anche solo da variazioni dei parametri di riferimento nel legame tra tecnologia e orario.

Si esamina pertanto la quantificazione di due parametri: le specifiche di distanziamento, cioè l'intervallo di programma dei convogli, nel caso di linee attrezzate con Blocco Automatico a correnti codificate e sezioni concatenate, e i margini di regolarità.

La definizione di traccia, come "frazione di capacità dell'infrastruttura ferroviaria necessaria a far viaggiare un convoglio tra due località in un determinato periodo temporale" [1], implica la necessità di tenere conto delle caratteristiche e dell'operatività dei sistemi tecnologici, che garantiscono la sicurezza dell'esercizio.

Esistono prassi diverse per la traduzione dei vincoli infrastrutturali che non permettono il contemporaneo utilizzo dello stesso tratto di binario da parte di più treni in un algoritmo applicabile per la costruzione dell'orario; ad esempio, il modello dei tempi di bloccamento, eventualmente con tempi di bloccamento stocastici [2]. Tuttavia in Italia, come in molte altre realtà, si preferisce riser-

#### 1. Introduction

*The intensification of service frequencies and the increased demand for train paths, even by competing operators, entails that on important segments and nodes of the railway network, infrastructures are requested to accommodate a number of trains per unit of time greater than has been necessary in the past. At the same time the performance requested as timetable stability with respect to punctuality is also increased.*

*Structural investments, characterised by an elevated financial and environmental cost and with long implementation times, cannot be the response to needs everywhere. It is therefore necessary to submit to analysis the methods used to program trains on the infrastructure, so as to identify cases where greater performance can be obtained even only by acting on the parameters in the relationship between technology and timetable.*

*The quantification of two parameters is therefore examined: design headways, namely the minimum allowed interval between subsequent trains programmed, in the case of lines with Encoded Currents Automatic Block (BAcc, the Italian signalling system for non-HS main lines) and multiple-section signalling, and regularity buffer times.*

*The definition of train path, as "fraction of rail infrastructure capacity needed to run a train between two places over a given time period" [1], implies the need to take into account the characteristics and operation of technology systems that guarantee operation safety.*

*The infrastructural constraints that do not allow simultaneous use of the same stretch of track by more trains are translated into an applicable algorithm for schedule construction according to different practices; for example, the blocking time model, possibly with stochastic blocking times [2]. However, in Italy, as in many other realities, we prefer to reserve the most refined methods to ex-post checks*

<sup>(\*)</sup> Ingegnere civile trasporti, dottore di ricerca.

<sup>(\*)</sup> Civil transport engineer, PhD.

vare i metodi più raffinati alla verifica a posteriori dell'orario in progetto, mediante simulazioni, utilizzando invece metodi di progettazione più immediati. Si utilizzano così le *specifiche tecniche d'orario*, intervalli minimi programmati tra l'utilizzo di un tratto di binario da parte di un treno e l'utilizzo da parte del treno successivo, che includono i *margini di regolarità*, cuscinetti di tempo per non propagare ad altri treni le perturbazioni cui è soggetta la circolazione<sup>(1)</sup>. Tali margini hanno un significato completamente diverso rispetto agli allungamenti di puntualità inclusi nella traccia: gli allungamenti hanno lo scopo di recuperare perturbazioni della marcia dovute a cause endogene alla marcia del treno stesso, i margini servono a tutelare dalle irregolarità delle circolazioni a contorno.

## 2. La quantificazione del tempo di bloccamento

Nel caso di linee attrezzate con Blocco Automatico a correnti codificate e sezioni concatenate, con segnalamento a tre o più aspetti, le specifiche di distanziamento, cioè l'intervallo minimo (in minuti) tra l'orario programmabile per il passaggio della testa di un treno ad un punto e l'orario programmabile per il passaggio della testa del treno successivo allo stesso punto, sono normalmente definite con un valore temporale fisso.

La marcia non perturbata dei treni richiede la disposizione a via libera dei successivi segnali con anticipo sufficiente perché il conducente non percepisca aspetti di segnalamento restrittivi. Infatti, il macchinista che percepisce aspetti restrittivi dai segnali che avvisano il segnale che protegge la sezione<sup>(2)</sup> è tenuto a regolare la marcia in maniera tale da prepararsi ad un segnale a via impedita, tenendo quindi una marcia diversa da quanto descritto dalle tabelle di percorrenza, che presuppongono una marcia non perturbata. Analogamente, non è sistematizzabile il comportamento del macchinista che percepisce un aspetto liberatorio a seguito di un avviso di via impedita e che imposta la marcia sulla base dell'interazione complessa tra treno precedente, treno seguente e infrastruttura.

Il tempo di bloccamento  $t_b$  è il tempo in cui la parte di infrastruttura protetta da un segnale di prima categoria è riservata in esclusiva ad un treno. Tale tempo è composto dai seguenti addendi (fig. 1):

*of the programmed timetable, through simulations, using more immediate operative design methods instead. The design headway times are used. They are the minimum intervals allowed when scheduling the use of a section of railway track by a train after the use by the preceding train. They include regularity buffer times, which have the aim not to propagate circulation<sup>(1)</sup> irregularities to other trains. These buffers have a completely different meaning than the recovery times included in the path: recovery times are intended to recover delays due to endogenous causes of the train operation itself, buffers serve to protect from irregularities of surrounding circulations.*

## 2. Quantification of blocking time

*In the case of lines with BAcc and multiple-section signalling, with three or more signal aspects, the design headway, i.e. the minimum interval allowed (in minutes) between the time programmed for the passage of a train head at one point and the programmable time for the passage of the next train head at the same point, is usually defined with a fixed time value.*

*The unperturbed running of trains requires that subsequent signals are cleared with sufficient lead so that the driver does not perceive any restrictive signalling aspect. In fact, the driver who perceives restrictive aspects from approach signals before the main signal<sup>(2)</sup> is required to adjust speed as to prepare for a signal at stop; therefore the speed he sets is different to the one used in scheduling to calculate the running time, which presupposes unperturbed operation. Similarly, a driver who perceives a clearing aspect after a restrictive aspect sets the train speed on the basis of a complex interaction between the previous train, his train and infrastructure, and this behaviour cannot be systematised.*

*The blocking time  $t_b$  is the time in which the stretch of infrastructure protected by a main signal is reserved exclusively for a train. This time includes the following addenda (fig. 1):*

- *path forming time,  $t_{iso}$*
- *time for the visibility of the first signal that may have a restrictive approach aspect for the section in question,  $t_{vis}$*
- *travel time between the first signal that may have a restrictive approach aspect for the section in question and the main signal that protects the section in question,  $t_{avp}$*

<sup>(1)</sup> In Italia il margine di regolarità completa la specifica di distanziamento giustapponendosi ai tempi di bloccamento deterministici. In altri Paesi è invece d'uso raggruppare i margini di regolarità al termine di batterie di treni distanziati del solo tempo di bloccamento. Il procedimento di compattazione, di cui alla [3], per il calcolo della potenzialità delle linee, è derivato da tale impostazione.

<sup>(2)</sup> Ogni segnale di prima categoria deve essere obbligatoriamente avvisato da almeno un altro segnale, cioè il macchinista deve sapere con il dovuto anticipo se il segnale cui si appropria è disposto a via impedita, via libera oppure via libera con riduzione di velocità [4].

<sup>(1)</sup> In Italy the buffer time is added to deterministic blocking times to complete the design headway. In other countries instead it is a custom to group regularity buffers at the end of sets of trains distanced only by blocking times. The compacting procedure, referred to in [3], for the calculation of line capacity, is derived from such custom.

<sup>(2)</sup> Each main signal must be mandatorily preceded by at least another approach signal, i.e. the driver must know in advance if the signal he is approaching is a signal set at stop, a clear signal or a clear signal to be passed with reduced speed [4].

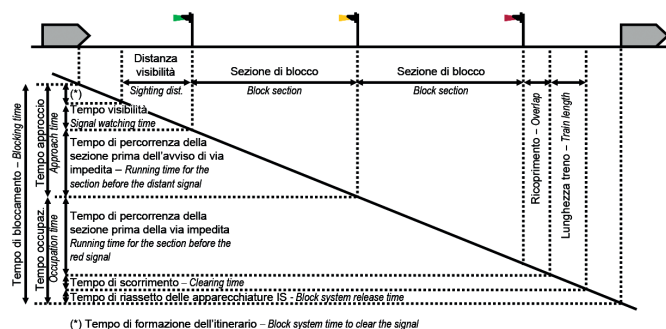


Fig. 1 - Componenti del tempo di bloccamento.  
Fig. 1 - Blocking time components.

- tempo di formazione dell'itinerario,  $t_{ISc}$ ;
- tempo per la visibilità del primo segnale di avviso che può assumere aspetto restrittivo per la sezione in oggetto,  $t_{vis}$ ;
- tempo di percorrenza tra il primo segnale di avviso che può assumere aspetto restrittivo per la sezione in oggetto ed il segnale di prima categoria che protegge la sezione in oggetto,  $t_{avv}$ ;
- tempo di percorrenza tra il segnale di prima categoria che protegge la sezione in oggetto ed il segnale di prima categoria della successiva sezione, più la distanza tra il segnale della successiva sezione e il giunto di fine sezione, più la lunghezza di eventuali circuiti di ricoprimento,  $t_p$ ;
- tempo di scorrimento, cioè tempo necessario perché tutta la lunghezza del treno liberi la sezione e l'eventuale circuito di ricoprimento,  $t_s$  (l'addendo precedente è riferito ad un punto specifico del treno, di solito la testa);
- tempo per il ritorno alla condizione di riposo delle apparecchiature tecnologiche,  $t_{ISu}$ .

Gli addendi  $t_{ISc}$ ,  $t_{vis}$ , e  $t_{avv}$  possono essere collettivamente definiti *tempo di approccio*, gli addendi  $t_p$ ,  $t_s$  e  $t_{ISu}$  *tempo di occupazione*.

Per blocchi con più di tre aspetti<sup>(3)</sup>, oppure per blocchi a sezioni di lunghezza ridotta, esistono più aspetti di avviso di via impedita, per cui treni lenti hanno maggiore tempo di occupazione, ma non perturbano la propria marcia se l'itinerario è creato con un determinato ritardo, perché la condotta è influenzata da un minor numero di aspetti di avviso; treni veloci hanno un ridotto tempo di occupazione, ma richiedono che l'itinerario sia formato

<sup>(3)</sup> Intendendo per aspetti del blocco non solo gli aspetti del segnalamento laterale, ma anche quelli del sistema di ripetizione in cabina.

- travel time between the main signal that protects the section in question and the main signal of the following section, plus the distance between the signal of the following section and the end section joint, plus the length of any overlap circuit  $t_p$ ;
- the clearing time, i.e. the time needed for the entire length of the train to clear the section and any overlap circuit,  $t_s$  (the previous addendum refers to a specific point of the train, usually the head);
- the release time needed by the block system to return to rest position,  $t_{ISu}$ .

The addenda  $t_{ISc}$ ,  $t_{vis}$ , and  $t_{avv}$  can be collectively defined as approach time, the addenda  $t_p$ ,  $t_s$ , and  $t_{ISu}$  as occupation time.

For signalling systems with more than three aspects<sup>(3)</sup>, or for signalling systems with short sections, there are multiple aspects approaching to a signal set at stop, so slow trains have greater occupation times, but their run is not perturbed if the path is cleared with some delay, because driving is affected by fewer approach aspects; fast trains have a reduced occupation time, but they require that the path is cleared well in advance, so that all signals that could communicate restrictive aspects are cleared<sup>(4)</sup>.

For parameter quantification, we assume  $t_{IS} = t_{ISc} + t_{ISu} = 15s$ , therefore including the time to move electrical switches, but not the time to close level crossings<sup>(5)</sup>.

In case of cab continuous signalling, the  $t_{vis}$  addendum is incorporated in the receiving space of the first restrictive code. Therefore, the travel time of the free sections necessary to maintain the cruise speed is given by  $t_{vis}$  plus  $t_{avv}$ . About  $t_{avv}$ , we must remember that in any case the distance between the main signal and the previous signal with approach function can never be greater than 2000 m [6] or 2250 m for lines equipped with BAcc and cab signalling<sup>(6)</sup>.

<sup>(3)</sup> Meaning by block aspects not only lateral signalling aspects but also any aspect shown by the repetition system on cab.

<sup>(4)</sup> For a capacitive analysis, that takes into account also the presence of multiple approach aspects, please refer to [5].

<sup>(5)</sup> Since BAcc is a normally-open block system, at open-line block signals the  $t_{ISu}$  time is null, as the block signal clears automatically as soon as the block section is cleared. The  $t_{ISu}$  time is very small, tending to zero, and therefore the whole  $t_{IS}$  term tends to zero. But, in complex stations with electronic interlockings, the clearing of encoded paths may require times considerably greater than 15"; therefore, in these cases, the calculations mentioned below must be adjusted.

<sup>(6)</sup> The possibility of distances between 2000 and 2250 m on lines with BAcc and cab signalling, permitted by the National Railway Safety Agency since November 2008, does not yet appear to have been adopted in official rule books.

per tempo, rispetto a tutti i segnali che potrebbero comunicare aspetti restrittivi<sup>(4)</sup>.

Per la quantificazione degli addendi, si assume  $t_{IS} = t_{ISc} + t_{ISu} = 15s$ , comprendendo quindi i tempi di manovra elettrica di deviatoi, ma non la manovra di chiusura di eventuali passaggi a livello<sup>(5)</sup>.

In presenza di ripetizione dei codici in macchina, l'addendo  $t_{vis}$  è inglobato nello spazio di captazione del primo codice restrittivo. Il tempo di percorrenza delle sezioni libere necessarie per il mantenimento della velocità di impostazione corrisponde così globalmente agli addendi  $t_{vis}$  e  $t_{avv}$ . In riferimento al parametro  $t_{avv}$ , è necessario ricordare che in ogni caso la distanza tra segnale di prima categoria e relativo segnale con funzione di avviso non può mai essere superiore a 2000m [6] o 2250m per le linee con Blocco Automatico a correnti codificate<sup>(6)</sup>.

In assenza di circuiti di ricoprimento<sup>(7)</sup>, il giunto di liberazione, dove termina la sezione di blocco, è normal-

*In the absence of overlap circuits<sup>(7)</sup>, the clearing joint, where the block section ends, is usually placed 20 m downstream of the signal. Instead, upon arrival in stations, the clearing of the last block section does not take place at the section end joint, but upon abandonment of the imperative circuit, downstream of the section end joint. While the distance between signal and release joint can be neglected in calculation, as it is offset by a similar distance at the beginning of the section, the distance corresponding to the imperative circuit must be considered, so a length equal to the length of the section itself plus the length of the imperative circuit must be attributed to the last section before a station.*

*Hereinafter the analyses are conducted in connection with a limited number of representative cases, as defined in table 1.*

*It is important to carry out an in-depth study of the complex set of interactions between signalling metrics, transmitted code and maximum speeds allowed when receiving different codes, as this interaction determines the headway between subsequent trains.*

*On lines equipped with BAcc the maximum speed allowed is 180 km/h with four-code system and 250 km/h*

<sup>(4)</sup> Per un'analisi di tipo capacitivo, che tenga conto anche della presenza di più aspetti restrittivi, si faccia riferimento a [5].

<sup>(5)</sup> Essendo il Blocco Automatico un regime di esercizio normalmente aperto, in corrispondenza di Posti di Blocco Intermedi il tempo  $t_{ISc}$  è nullo, disponendosi automaticamente al verde il segnale alla liberazione della sezione. Il tempo  $t_{ISu}$  è molto piccolo, tendente a zero, e perciò l'intero termine  $t_{IS}$  tende, in corrispondenza di Posti di Blocco Intermedi, a zero. D'altronde, per impianti complessi governati da apparati centrali di tipo ACC, la formazione di itinerari codificati può richiedere tempi sensibilmente superiori a 15", pertanto, in tali casi, i calcoli riportati nel seguito devono essere adeguati.

<sup>(6)</sup> La possibilità di distanze comprese tra 2000 e 2250m sulle linee con Blocco Automatico a correnti codificate, ammessa dall'Agenzia Nazionale per la Sicurezza delle Ferrovie a partire da novembre 2008, non risulta sia stata ancora recepita nei testi regolamentari.

<sup>(7)</sup> In riferimento al tempo di percorrenza  $t_p$ , merita un inciso la presenza dei circuiti di ricoprimento. Essi, di lunghezza massima di 100m, sono previsti dalle NUAS [7], come franco di sicurezza da adottarsi rispetto ad un treno di massima composizione fermo al successivo segnale di prima categoria. A seguito dell'abolizione dei Fascicoli Orario e conseguentemente dell'indicazione del numero massimo di assi dei treni ammessi sulla linea, la modalità di determinazione indicata dalla norma per tale massima composizione viene a non essere più applicabile, ed è di consuetudine sostituita dai limiti alla composizione dovuti alla frenatura, di cui all'art. 73 tabella 38 della PGOS [8], che ammette treni merci di lunghezza fino a 1000m. Ciò significa che, su linee non espressamente riservate ai servizi viaggiatori, ogni volta che due segnali di prima categoria si trovino a distanze inferiori a 1100m, è necessario introdurre un circuito di ricoprimento, cioè uno spazio oltre il segnale di fine sezione da liberare per permettere l'apertura del segnale di ingresso alla sezione. Tale circuito cresce linearmente per sezioni di lunghezza da 1100m, per stabilizzarsi sul valore 100m per sezioni di lunghezza inferiore a 1000m. Il circuito di ricoprimento crea di fatto un allungamento della sezione, che compromette parte del vantaggio dell'adozione di sezioni corte e può introdurre un errore sistematico nel calcolo delle specifiche. In realizzazioni moderne si è orientati a tenere conto del fatto che, in conformità al Prospetto Informativo della Rete, non vengono commercializzati treni di lunghezza superiore a 750m, provvedendo alla normazione di tale limitazione linea per linea nel relativo fascicolo, per cui l'utilizzo sistematico di circuiti di ricoprimento può essere limitato a sistemi di distanziamento con sezioni anormalmente corte (cioè di lunghezza inferiore a 900m).

<sup>(7)</sup> With reference to the travel time  $t_p$ , the presence of overlap circuits deserves a brief aside. These, with a maximum length of 100 m, are required by NUAS [7], as a safety precaution to be taken in relation to a maximum length train at a standstill at the next main signal. Following the abolition of timetable leaflets and, consequently, of the indication of the maximum number of axes allowed for trains on the line, the method prescribed to determine the maximum train length is no longer applicable. It is usually replaced by limits to the composition due to braking, pursuant to art. 73 Table 38 of the PGOS [8], which allows freight trains of up to 1000 m long. This means that, on lines that are not expressly reserved for passenger services, whenever two main signals are spaced less than 1100 m apart, it is necessary to introduce an overlap circuit, i.e. a space beyond the end-of-section signal to be cleared in order to allow the clearing of the main signal of the section. This circuit lengthens linearly for sections with a length from 1100 to 1000 m, and it is 100 m long for sections shorter than 1000 m. The overlap circuit de facto creates an extension of the section, which undermines part of the advantage of adopting short sections and can introduce a systematic error in the calculation of design headway times. Designing new block systems, we tend to take account of the fact that, according to the Italian Network Statement, trains longer than 750 m are not marketed. The systematic use of overlap circuits can be limited to block systems with "abnormally short" sections (i.e. less than 900 m long). Following the same logic, the elimination of overlap circuits could also be fostered on lines reserved to passenger traffic, where sections are longer than 550 m, and on lines reserved for regional passenger traffic, where sections are longer than 400 m, in connection with standard train lengths, amounting to 400 m for long-distance passenger trains and 250 m for regional passenger trains. The use of overlap circuits is still needed in specific situations, where it is expected that in ordinary conditions a train at a standstill could have its tail at less than 100 m from the section main signal; for example, in the case of platforms immediately after the signal. Such situations should be considered in determining the maximum length of the section according to which design headway time is calculated.

mente posto 20m a valle del segnale. Invece, all'arrivo nelle località di servizio, la liberazione della sezione di blocco non avviene al giunto di termine sezione, ma all'abbandono del circuito imperativo, posto a valle del giunto di fine sezione. Mentre la distanza tra segnale e giunto di liberazione può essere trascurata ai fini del calcolo, essendo tra l'altro compensata da analoga distanza all'inizio della sezione, la distanza corrispondente al circuito imperativo va considerata, per cui, all'ultima sezione in arrivo ad una località di servizio, va attribuita una lunghezza pari alla lunghezza della sezione stessa più la lunghezza del circuito imperativo.

Nel seguito le analisi sono condotte in relazione ad un limitato numero di casi rappresentativi della circolazione, definiti in tabella 1.

È importante procedere ad un approfondimento del complesso insieme di interazioni tra metrica del segnalamento, codice trasmesso e velocità massime ammesse alla captazione dei diversi codici, che ha effetto sulle interazioni tra treni successivi.

Su linee attrezzate con Blocco Automatico a correnti codificate la velocità massima ammessa dal sistema di segnalamento italiano è di 180 km/h per linee attrezzate con sistema a quattro codici e 250 km/h per linee attrezzate con sistema a nove codici. La sequenza normale di codici in precedenza ad un segnale di prima categoria a via impedita è: 270\*\*, 270\*, 270, 180, 75; i primi due codici si hanno solo per linee attrezzate con più di 4 codici.

I limiti di velocità alla captazione dei vari codici seguono una casistica articolata, dettagliata nella normativa in vigore<sup>(8)</sup>, in dipendenza della percentuale di massa frenata del treno e del tipo di frenatura; per i casi rappre-

Seguendo la stessa logica, si potrebbe prevedere l'eliminazione dei circuiti di ricoprimento anche sulle linee riservate al traffico viaggiatori, per sezioni di lunghezza superiore a 550m, e sulle linee riservate al traffico viaggiatori regionale, per sezioni di lunghezza superiore a 400m, in relazione ai moduli commerciali di categoria, rispettivamente pari a 400m per i treni viaggiatori di lunga percorrenza e a 250m per i treni viaggiatori regionali.

L'uso dei circuiti di ricoprimento permane in situazioni specifiche, nelle quali sia prevedibile che in condizioni ordinarie un treno fermo si trovi con la coda a meno di 100m dal segnale di inizio sezione, ad esempio nel caso di marciapiedi di fermata subito a valle del segnale. Tali situazioni vanno considerate nella determinazione della massima lunghezza di sezione in riferimento alla quale svolgere il calcolo della specifica.

<sup>(8)</sup> Tabelle di frenatura B speciali art. 81 PGOS quadri 1° bis, 1° ter, 1° quater e 2° bis e tabelle di cui ai punti 3.2 e 3.3 della Sezione I delle NEAT [9].

TABELLA 1 – TABLE 1  
CASI RAPPRESENTATIVI DELLA CIRCOLAZIONE SELEZIONATI PER L'ANALISI  
RELEVANT CASES SELECTED FOR ANALYSIS

Id. Caso Case id.	Tipo treno Train type	Frenatura Braking	% Massa frenata Braked mass %	Velocità di impostaz. Setting speed	Standard lunghezza Length standard
MM	Merci Freight	Merci Freight	75	90 km/h	750 m
MV	Merci Freight	Viaggiatori Passengers	75	100 km/h	750 m
RL	Reg	Viaggiatori Passengers	125	140 km/h	250 m
RV	Reg Veloce Fast Reg	Viaggiatori Passengers	130	160 km/h	250 m
ES	ES*	Viaggiatori Passengers	135	250 km/h	400 m

with nine-code system. The normal sequence of codes before a main signal set at stop aspect is: 270\*\*, 270\*, 270, 180, 75; the first two codes are only for lines with more than 4 codes.

The maximum speed allowed when receiving the various codes varies on an articulated set of limits detailed on the rule books<sup>(8)</sup>, depending on the percentage of braked mass and the braking type. The speed limits for the representative cases mentioned in table 1 are listed, in km/h, in table 2<sup>(9)</sup>.

In case of multiple signalling (with at least three aspects), encoding is usually extended to an entire block section and is applied in reference to the following constraints:

- the reception extent of code 180 and of codes above must be equal to at least 1350 m [10];
- code 180 must be received at least 2700 m before the main signal at stop (or cleared for a deviated route)<sup>(10)</sup>;

<sup>(8)</sup> Special braking tables art. 81 PGOS charts 1° bis, 1° ter, 1° quater and 2° bis and tables in paragraphs 3.2 and 3.3 of Section I of the NEAT [9].

<sup>(9)</sup> For lines with braking degrees exceeding IV reference is made to tables B chart 1 and 2 Art. 81 PGOS, which prescribe speed limits independent from the code but significantly restrictive. For the percentage values of braked mass below mentioned:

Grado fren. → % massa fren. ↓	V	VI	VII	VIII	IX
70	85	80	70	65	55
105	110	100	95	85	75
130	125	115	105	95	85
135	125	120	110	100	90

Grado fren. Line braking degree

Massa fren. Braked mass

There are cases into the RFI network where the maximum speed limit is never liable, because of the limitations into the mentioned charts, even with the highest percentage of braked mass considered (e.g. in the Fleres Tunnel near the Brenner Pass).

<sup>(10)</sup> NEAT part I section I art. 4.



sentativi di cui in tabella 1, sono riportati, in km/h, in tabella 2<sup>(9)</sup>.

In caso di segnalamento accoppiato (ad almeno tre aspetti), la codifica è estesa di norma ad un'intera sezione di blocco ed è applicata in riferimento ai seguenti vincoli:

- l'estesa di captazione del codice 180 e dei codici superiori deve essere pari ad almeno 1350 m [10];
- il codice 180 deve essere captato almeno 2700 m prima del segnale di prima categoria a via impedita o a via libera per un percorso deviato<sup>(10)</sup>; cioè l'estesa di captazione di codice 180 più l'estesa di codice 75 deve essere pari ad almeno 2700 m.

Tralasciando il caso del codice 270\*\*, che è applicato solo con segnalamento non accoppiato<sup>(11)</sup> o per brevi tratti<sup>(12)</sup>, è interessante notare come l'adozione di sezioni di blocco normalmente corte in presenza di codifica di binario sia in genere lesiva rispetto alla capacità, come si illustra nella fig. 2 applicata a un treno di categoria ES: il caso (a) mostra la situazione di sezioni di blocco di lunghezza normale di 1350 m; in tale caso la velocità di 115 km/h – limite imposto dal ricevimento del codice 180 – può essere superata già 2700 m in precedenza al segnale a via impedita. La situazione non cambia in presenza di sezioni normalmente ridotte della lunghezza minima consentita: 900 m (caso b), per le quali la distanza di 2700 m dal segnale a via impedita per la captazione del codice 180 è ottenuta ribattendo tale codice per due se-

<sup>(9)</sup> Per gradi di frenatura superiori al IV si fa riferimento alle tabelle B quadro 1° e quadro 2° art. 81 PGOS, che danno limitazioni di velocità indipendenti dal codice ma significativamente restrittive. Per i valori di percentuale di massa frenata di cui sotto:

Grado fren. → % massa fren. ↓	V	VI	VII	VIII	IX
70	85	80	70	65	55
105	110	100	95	85	75
130	125	115	105	95	85
135	125	120	110	100	90

Esistono sulla rete RFI casi in cui la velocità massima di fiancata non è mai perseguibile, a motivo delle limitazioni delle tabelle citate, anche con la massima percentuale di massa frenata considerata (ad es. nella galleria Fleres presso Brennero).

<sup>(10)</sup> NEAT parte I sezione I art. 4.

<sup>(11)</sup> Linea Direttissima Roma – Firenze.

<sup>(12)</sup> Risulta all'autore che la possibilità, prevista all'art. 63.5 della PGOS, di autorizzare velocità massime di 250 km/h in presenza di segnalamento accoppiato per tratti di lunghezza fino a 25 km, sia ad oggi utilizzata solo per la tratta Mi.Rogoredo-B./P.C. Melegnano della linea AV/AC Milano-Bologna. Per un approfondimento sulle considerazioni che hanno permesso una tale apertura, si veda [11].

TABELLA 2 – TABLE 2

LIMITI DI VELOCITÀ ALLA CAPTAZIONE DEI CODICI RMS PER LINEE CON GRADO DI FRENATURA FINO AL V

SPEED LIMITS PRESCRIBED WITH DIFFERENT CODES ON LINES WITH BRAKE GRADE NOT GREATER THAN V

	Codice captato Code received							
	75	120	120*	180	180*	270	270*	270**
MM	40	30/60		65		90	90	90
MV	50	30/60/85	85	85	100	100	100	100
RL	50	30/60/100	100	110	140	140	140	140
RV	50	30/60/100	100	110	150	160	160	160
ES	50	30/60/100	100	115	150	180	230	250
Velocità limitata in ogni caso a 150 km/h su linee con grado di frenatura V Speed limited in any case to 150 km/h on lines with braking degree V								

i.e. the reception extent of code 180 plus the extent of code 75 must be at least 2700 m.

Leaving aside the case of code 270\*\*, that is applied only in one-section signalling<sup>(11)</sup> or for short stretches<sup>(12)</sup>, it is interesting to note how the adoption of "normally short" block sections with track encoding is usually detrimental to the capacity, as illustrated in fig. 2, applied to an ES category train: case (a) shows the situation of block sections with a normal length of 1350 m; in this case the speed of 115 km/h – speed limit when receiving code 180 – may be overcome already at 2700 m before the signal at stop. The situation does not change in the presence of normally short sections of the minimum allowable length: 900 m (case b), for which the 180 code extent of 2700 m from the signal at stop is obtained by transmitting such code for two sections. But two-section encoding is also required for any length of short sections, because only normal sections, longer than 1350 m, meet the 2700 m requirement with a single-section transmission. Therefore, on short sections between 901 and 1349 m, the distance to travel at a speed not greater than 115 km/h lengthens (e.g. case c). In the limit case of short sections 1349 m long, the speed exceeding 115 km/h can be achieved only at 4047 m, against 2700 m obtainable with normal optimised sections. The reception of code 270\* is in any case of short section pushed farther.

Therefore, the number of clear sections in front of the train to maintain the maximum cruise speed without limitations due to restrictive codes received depends on whether the train is set to lower or higher speed compared to the

<sup>(11)</sup> Rome-Florence High Speed / High Capacity Line.

<sup>(12)</sup> The possibility stated in art. 63.5 PGOS, to authorise maximum speeds of 250 km/h with multiple-signalling BAcc for stretches long up to 25 km, is used only for the Mi.Rogoredo-B./P.C. Melegnano stretch of the HS/HC line Milan-Bologna. Please refer to [11] about the studies underlying such possibility.

zioni. Avvenendo tuttavia la codifica per sezioni intere, la doppia ribattuta si rende necessaria anche per tutte le lunghezze di sezione ridotte, perché solo sezioni normali da 1350 m consentono di rispettare i 2700 m con una ribattuta singola. Quindi, su sezioni ridotte tra 901 e 1349 m, il tratto da percorrersi a velocità massima di 115 km/h si allunga (es. caso c). Al caso limite di sezioni ridotte di 1349 m, la velocità superiore a 115 km/h può essere conseguita solo a 4047 m, contro 2700 m ottenibili con sezioni normali ottimizzate. La captazione del codice 270\* è in ogni caso allontanata.

Quindi il numero di sezioni libere di fronte al treno per mantenere la massima velocità di impostazione senza limitazioni dovute alla captazione di codici restrittivi dipende dal fatto che il treno sia impostato a velocità inferiore o superiore rispetto al limite di velocità per captazione di codice 180<sup>(13)</sup>, in riferimento alla specifica combinazione di tipo di frenatura e percentuale di massa frenata. Inoltre esiste una discontinuità a seconda se le sezioni sono di lunghezza normale o normalmente ridotta.

Assumendo una lunghezza di sezione uniforme, dal minimo per sezioni normalmente corte, di lunghezza 900 m, al massimo ammesso per segnalamento accoppiato, pari a 2250 m, il tempo di bloccamento varia secondo il grafico di fig. 3 (superiore). Il calcolo dei valori è dettagliato in Appendice 1.

Emergono interessanti considerazioni:

- l'adozione di un BAcc a sezioni normalmente corte non consente, in condizioni di marcia non perturbata, di diminuire significativamente i tempi di bloccamento tra un treno e l'altro, conseguendosi, nel confronto fra le situazioni ottimizzate (900 m e 1350 m), riduzioni comprese tra il 9 e il 10% e comunque sempre inferiori a 20 secondi.
- l'adozione di un BAcc a sezioni normalmente corte con sezioni non ottimizzate, di lunghezza prossima a quella di un BAcc a sezioni normali ben ottimizzato, produce tempi di bloccamento paragonabili a quelli di un BAcc con sezioni di notevole lunghezza.
- la presenza di treni a velocità limitata è fortemente impattante sulla capacità, con aumento dei tempi di bloccamento di circa due terzi per treni merci con frenatura viaggiatori e superiori all'80% per treni con frenatura di tipo merci; si consideri, come riportato in tabella 5 in Appendice 1, che il contributo della maggiore lunghezza dei treni merci è minoritario rispetto all'effetto della velocità ridotta.
- i tempi di bloccamento dipendono relativamente poco dalla velocità di impostazione dei treni viaggiatori (circa per il 13-16%).

<sup>(13)</sup> Analoga distinzione casistica va fatta a seconda che il treno sia impostato a velocità superiore o inferiore al limite imposto dalla captazione del codice 270.

speed limit prescribed for code 180<sup>(13)</sup> in reference to the specific combination of type of braking and braked mass percentage. In addition, there is a discontinuity depending on whether sections are of normal length or normally short.

Assuming a uniform section length, from minimum for normally short sections (900 m), to the maximum allowed

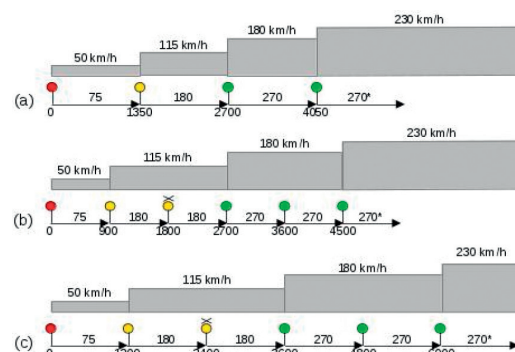


Fig. 2 - Limite di velocità su linee con grado di frenatura fino al IV, attrezzate con Blocco Automatico a correnti codificate, per sezioni di lunghezza normale (a), di lunghezza normalmente ridotta di 900 m (b), di lunghezza normalmente ridotta di 1200 m (c) in riferimento ad un treno con frenatura di tipo viaggiatori e percentuale di massa frenata del 135%.

Fig. 2 - Speed limit on BAcc-equipped lines with brake degree not greater than IV, on normally long sections (a), 900-m sections (b) and 1200-m sections (c), referred to a train with passenger brake and 135% braked mass percentage.

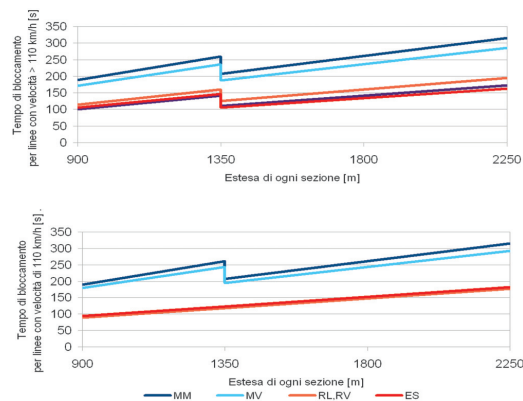


Fig. 3 - Tempo di bloccamento in funzione della lunghezza di sezione per linee in BAcc con velocità superiore (sopra) o uguale (sotto) a 110 km/h.

Fig. 3 - Blocking time related to section length for BAcc-equipped lines with speed higher (above) or lower (below) than 110 km/h.

<sup>(13)</sup> Similar case distinction is made depending on whether the train is set to higher or lower speed than the limit set for code 270.

- all'interno dei rispettivi domini di sezioni normali e sezioni corte, i tempi di bloccamento dipendono per circa un terzo dalla lunghezza effettiva delle sezioni.

Inoltre, variando la lunghezza dei treni, si verifica che l'accorciamento dello standard dà vantaggi irrisori, tanto per i treni viaggiatori, che accorciati da 400 a 250 m conseguono una diminuzione dei tempi di bloccamento dell'ordine dei 2 s, tanto per i treni merci, che, riportati al valore oggi comune di 575 m recuperano 7 s, ed alla lunghezza fuori mercato di 250 m non conseguono mai guadagni superiori a 20 s.

Il valore aggiunto derivante dall'adozione di sezioni di lunghezza normalmente ridotta è più evidente nel caso di una linea con velocità massima di 110 km/h, anch'essa attrezzata con BAcc (fig. 3 inferiore). Su una linea di tali caratteristiche, i treni viaggiatori non subiscono gli effetti restrittivi della captazione del codice 180, che invece permangono per i treni merci. Pertanto, per i primi, è necessaria la presenza di una sola sezione libera antecedentemente al treno. Dal momento che l'inizio della frenatura avviene in questo caso alla percezione del segnale ad avviso di via impedita e non alla ricezione del codice 180, è necessario però aggiungere il tempo per la visibilità del segnale di avviso  $t_{vis}^{(14)}$ . I tempi di percorrenza della sezione di avviso crescono linearmente con la lunghezza di sezione senza subire la discontinuità che si ha per velocità superiori. Confrontando le condizioni ottimizzate di sezioni normali e sezioni corte, si ottiene con le seconde un contenimento dei tempi fino al 22% per i treni viaggiatori.

Sulle tratte di linee principali nei nodi e sui tronchi di accesso ai nodi, dove le velocità di fiancata sono in genere maggiori di 110 km/h, l'adozione di sezioni normalmente corte non si mostra quindi come lo strumento per consentire riduzioni di distanziamento, anzi può conseguire l'effetto opposto. In tali contesti, si potrebbero accettare specifiche di distanziamento diverse per treni impostati a velocità superiori o minori e uguali di 110 km/h, conseguendo distanziamenti minori solo per i treni più lenti. La condizione è che il sistema di distanziamento sia ben ottimizzato, cioè che la distanza tra successivi segnali di prima categoria sia quanto più possibile prossima a 900 m.

### 3. Successioni di treni con fermata

Una successione a specifica  $S$  di treni con fermata comporta condizioni diverse da quelle di transito, con un avvicinamento dei treni presso la località di fermata,

for multiple-section signalling (2250 m), the blocking time varies according to the graph in fig. 3 (top). The calculation of the values is detailed in Appendix 1.

Interesting points emerge:

- adopting a BAcc with sections that are normally short does not allow, under conditions of unperturbed operation, to significantly decrease blocking times between a train and the other, thus achieving, in the comparison between optimized situations (900 m and 1350 m), reductions of no more than 9 or 10 percent and however always lower than 20 seconds;
- adopting a BAcc with normally short sections with a non-optimised section length, close to that of a well-optimised BAcc with normal sections, produces blocking times comparable to those of a BAcc with considerably long sections;
- the presence of trains with limited speed is strongly impacting on the capacity, with an increase in blocking times by about two thirds with freight trains with passenger braking and greater than 80% for trains with freight type braking; consider, as reported in table 5 in Appendix 1, that the contribution of greater length of freight trains is less important than the effect of reduced speed;
- blocking times are relatively little depending on the cruise speed set for passenger trains (approximately 13-16%);
- within the respective domains of normal sections and short sections, blocking times are for about one-third depending on the actual length of sections.

In addition, by varying the length of trains, the result is that the shortening of the standard gives insignificant benefits, as much for passenger trains that shortened from 400 to 250 m result in a decrease of blocking times in the order of 2 s, as for freight trains, which, related to the today common value of 575 m recover 7 s while at the length of 250 m, far away from the market, never achieve gains greater than 20 s.

The added value resulting from the adoption of normally short sections emerges in the case of a line with a maximum speed of 110 km/h, also equipped with BAcc (fig. 3 bottom). On a line with those characteristics, passenger trains do not suffer the restrictive effects of code 180, which instead remain for freight trains. Therefore, for the first, the presence of a single clear section before the train is required. Since the beginning of braking in this case occurs upon visibility distance of the approach signal and not when receiving code 180, the time for the visibility of the approach signal  $t_{vis}$  must be added<sup>(14)</sup>. The travel time of the approach section grows linearly with the length of the section, without suffering the discontinuity that occurs for

<sup>(14)</sup> La distanza di visibilità è fissata dall'art. 54 del Regolamento sui Segnali in 200 m per linee a velocità massima uguale o superiore a 90 km/h e in 150 m per linee a velocità massima inferiore.

<sup>(14)</sup> The visibility distance is established by article 54 of the Signal Rule Book at 200 m for lines with a maximum speed equal to or greater than 90 km/h and at 150 m for lines with a lower maximum speed.



quando tra il treno antecedente in procinto di partenza ed il treno successivo in procinto di arrivo il distanziamento programmato è in realtà pari ad  $S - t_f$ , dove  $t_f$  è il tempo di fermata. È d'uso, in queste situazioni, distanziare comunque le tracce secondo la medesima specifica.

È ammissibile che, mentre il treno si arresta, percepisca una sequenza di aspetti restrittivi di codice in arrivo alla fermata, secondo le successioni di codice esposte nel paragrafo precedente. Tuttavia, affinché tale sequenza di codici si realizzi effettivamente rispetto alla sezione contenente la fermata e non rispetto alla sezione precedente, si dovrà garantire che il treno antecedente abbia liberato per tempo la sezione di fermata. Cioè, il treno antecedente dovrà avere liberato e le apparecchiature tecnologiche dovranno avere predisposto il successivo itinerario di arrivo quando il treno seguente si trova ad una distanza pari alle sezioni richieste libere per il transito.

Quindi, l'intervallo alla fermata  $I'_f$  tra la partenza del primo treno e l'arrivo del secondo sarà dato da tre contributi: il tempo di liberazione della sezione di fermata da parte del treno antecedente, il tempo di riassetto delle apparecchiature tecnologiche, il tempo di arrivo del treno seguente.

Siano  $a$  ed  $L_T$  rispettivamente l'accelerazione e la lunghezza del treno antecedente,  $V$  la velocità di impostazione del treno seguente sulla tratta,  $N$  il numero di sezioni necessarie libere,  $L_S$  la lunghezza delle sezioni. Si avrà, nell'ipotesi di segnale al termine del marciapiede:

$$I'_f = (2L_T/a)^{1/2} + t_{IS} + 7,2 N L_S / V$$

Ci sarà poi un  $I''_f$  che dovrà garantire che il secondo treno, alla ripartenza dopo la fermata, non percepisca aspetti di codice restrittivi, cioè che il treno antecedente si sia allontanato a sufficienza. Si noti che assumere in questo caso che il segnale di partenza sia al verde (cod. 270 o superiori) e che sullo stazionamento non siano trasmessi codici restrittivi significa ammettere che, appena superato il segnale di partenza, il treno possa trovare codici restrittivi, quindi non si tratta di una marcia non perturbata, ma di una condizione di ragionevole perturbazione, per la quale il macchinista possa sopporre di ricevere il codice liberatorio durante il transitorio di avviamento.

Il tempo che deve intercorrere sarà quindi dato dalla somma del tempo che il treno antecedente impiega a liberare le  $N$  sezioni necessarie dopo la fermata (spazio in parte percorso in moto uniformemente accelerato ed in parte in moto rettilineo uniforme), compreso il tempo di scorrimento, e del tempo di riassetto delle apparecchiature di segnalamento:

$$I''_f = 3,6 (N L_S + L_T) / V + V / (7,2 a) + t_{IS}$$

Il tempo di bloccamento da considerarsi in prossimità della fermata dovrà essere il maggiore tra  $I'_f$  ed  $I''_f$ .

Limitando l'analisi ai treni viaggiatori con velocità

higher speeds. Comparing the optimised conditions of normal sections and short sections, with the second there is a time reduction of up to 22% for passenger trains and 33% for freight trains.

On main lines inside and accessing network nodes, where speed limits are typically greater than 110 km/h, the adoption of normally short sections does not appear to be the instrument to achieve headway reductions; on the contrary it may achieve the opposite effect. In such contexts, different design headways could be accepted for trains set with speeds greater than or less than and equal to 110 km/h, with shorter headways only for slower trains. The condition is that the block system is properly optimised, which means that the distance between subsequent main signals is as much as possible close to 900 m.

### 3. Sequences of trains with stops

A sequence of stopping trains with design headway  $S$  causes different conditions than non-stop trains, as trains get closer to each other by the stop, when between the previous train about to depart and the next train about to arrive, the headway programmed is actually equal to  $S - t_f$  where  $t_f$  is the stop time. Nevertheless, it is usual, in these situations, to schedule paths with the same design headway  $S$ .

It is acceptable that, as the train stops, a sequence of restrictive codes is received onboard, according to the code sequences set out in the previous paragraph. However, in order that this sequence of codes is actually achieved with respect to the section containing the stop platform and not to the previous section, it must be ensured that the preceding train has cleared the stop section in time. That is to say, the preceding train must have cleared the section containing the stop and the technological system must have been set for the following arrival path when the following train is at a distance equal to the one requested for non-stop trains.

Therefore, the interval at the stop  $I'_f$  between the departure of the first train and the arrival of the second will be given by three contributions: the clearing time of the stop section by the previous train, the reset time of the block system, the arrival time of the following train.

Be  $a$  and  $L_T$  respectively acceleration and length of the previous train,  $V$  the cruise speed set for the following train,  $N$  the number of sections required free,  $L_S$  the length of the sections. The result, assuming the signal at platform end, is:

$$I'_f = (2L_T/a)^{1/2} + t_{IS} + 7,2 N L_S / V$$

Then an  $I''_f$  must be considered, to ensure that the second train, departing after the stop, does not perceive restrictive code aspects, i.e. the previous train is at a sufficient distance. Note that assuming in this case that the start signal is green (cod. 270 or above) and that restrictive codes are not transmitted at the stop track, means admitting that, just after going past the start signal, the train can find restrictive codes, so this is not unperturbed operation, but a

d'impostazione di 140 km/h e per diversi valori di accelerazione si ottiene che  $I'_f$  è sempre maggiore di  $I''_f$ , quindi il tempo di bloccamento minimo tra treni con fermata,  $I_p$ , è pari a  $I'_f$ . Questo significa che il distanziamento tra due treni è determinato dall'intervallo necessario perché il treno a seguito non subisca perturbazioni in arresto che causino una marcia diversa da quella che avrebbe come traccia isolata.

Per linee con velocità superiore a 110 km/h, tale valore è molto più grande rispetto a quello determinato per treni a seguito in transito, ed è approssimabile ad un incremento di 1'30" per tutti i valori di lunghezza di sezione e di accelerazione. Per linee con velocità minore, invece, i valori sono comparabili, ed è quindi possibile adottare i valori di bloccamento per treni in transito.

Il distanziamento minimo va ricavato aggiungendo in tutti i casi il tempo di sosta programmato.

#### 4. I margini di regolarità

Il margine di regolarità è l'addendo che si somma al tempo di bloccamento – tempo tecnico – per evitare per quanto possibile che irregolarità della marcia dei treni si propaghino ad altre circolazioni.

La quantificazione dei margini di regolarità, così come degli allungamenti di percorrenza, è estremamente delicata, in quanto essi riducono la produttività dell'infrastruttura e la domanda soddisfabile, ma costituiscono la robustezza del sistema orario rispetto alla stabilità alle perturbazioni.

Non è facile definire il legame tra margini introdotti e livello di puntualità conseguibile, anche perché la collocazione spaziale e temporale degli allungamenti e dei margini influisce in maniera determinante sulla stabilità complessiva del sistema, come viene messo in luce dalle simulazioni di rete che talvolta vengono condotte [12].

Un orario è stabile quando è attuabile rispetto al livello di qualità scelto per il sistema. Essendo ammissibile per il livello di puntualità obiettivo che i treni viaggino al limite della fascia di puntualità, anche quando tutti i treni viaggiano al limite di puntualità le interazioni che scaturiscono non devono spingere alcun treno al di fuori di tale fascia. I margini devono inoltre consentire l'assorbimento delle perturbazioni che si possono generare, con ripercussioni finite nel tempo e determinabili a priori. In particolare grandi perturbazioni, cioè treni viaggianti fuori fascia, devono dare ripercussioni sugli altri treni, già viaggianti al limite di stabilità, che si riducono a perturbazioni piccole (cioè in fascia) entro un tempo di propagazione finito.

Si consideri un orario in cui la qualità è misurata rispetto ad un fascia di puntualità  $F$ , per la quale si ha come obiettivo una percentuale di treni in fascia pari a  $P$ . Sarà in ritardo un treno il cui scostamento a destino è maggiore di  $F$ .

*reasonably perturbed condition, for which the driver can suppose to receive the liberating code during the start-up transient.*

*The time that must elapse is given by the sum of the time that the previous train takes to clear the  $N$  sections required after the stop (path that is partly run in uniformly accelerated motion and partly in uniform rectilinear motion), including clearing time, and block system reset time:*

$$I''_f = 3,6 (N L_s + L_p) / V + V / (7,2 a) + t_{is}$$

*The blocking time to be considered at the stop must be the greater between  $I'_f$  and  $I''_f$ .*

*Limiting the analysis to the passenger trains with cruise speed set at 140 km/h and for several values of acceleration we get that  $I'_f$  is always greater than  $I''_f$ , therefore the minimum blocking time between stopping trains,  $I_p$ , is equal to  $I'_f$ . This means that the headway between two trains is determined by avoiding that the following train suffers perturbation in stopping compared to the braking of an isolated train.*

*For lines with speed greater than 110 km/h, this value is much greater than the one determined for non-stopping trains, and it is approximated as an increase of 1' 30" for any value of section length and acceleration. For lower speed lines, instead, the values are comparable, and the blocking values for non-stopping trains can be adopted.*

*In all cases the minimum design headway is calculated by adding the scheduled stopover time.*

#### 4. Regularity buffer times

*The regularity buffer time is the time added to the blocking time – that is a technical time – to avoid as much as possible that train operation irregularities are transmitted to other trains.*

*Quantification of regularity buffers, as well as recovery times, is extremely delicate, since they reduce the infrastructure productivity and satisfiable demand, but they constitute the strength of the timetable with respect to stability to perturbations.*

*It is not easy to define the link between buffers introduced and achievable punctuality level, also because the spatial and temporal location of recovery and buffer times affects the overall stability of the system in a decisive way, as highlighted by network simulations that have been performed [12].*

*A timetable is stable when it can be put into operation achieving the quality level chosen for the system. Being it eligible for the punctuality target level that trains travel with a punctuality threshold delay, even when all trains travel at that threshold their interactions should not push any train beyond the threshold. Buffers should also allow the absorption of perturbations that can emerge, with impacts finite over time and that can be pre-determined. In particular, large perturbations, i.e. trains travelling beyond punctuality*

Per semplicità, la densità di probabilità di scostamento dei treni entro la fascia può essere assunta uniforme, per una probabilità cumulata su tutta la fascia pari a  $P^{(15)}$ . I treni sono impostati secondo una specifica  $S$ , costituita dal tempo di bloccamento  $t_b$  più un margine  $M^{(16)}$ .

Nel caso si susseguano treni con la stessa fascia di puntualità, si può affermare che qualsiasi scostamento del primo treno entro fascia non si ripercuote sul secondo treno alla seguente condizione:  $S > F + t_b$ .

Infatti, il treno perturbato può essere seguito da un altro appena trascorso il tempo di bloccamento (fig. 4a).

Se invece  $S < F + t_b$ , lo scostamento del primo treno può ripercuotersi sul secondo. Per definizione, tuttavia,  $S \geq t_b$ ; anche nel caso limite di uguaglianza, in cui cioè la specifica non preveda margini, la perturbazione propagata al secondo treno può essere al più quella del primo treno. Vale pertanto il seguente principio fondamentale: nessuno scostamento entro fascia di un treno può portare fuori dalla stessa fascia i treni interferiti (fig. 4b). Scostamenti maggiori ricomprendono scostamenti minori, per cui se il secondo treno si presenta perturbato per motivi propri, non dipendenti dal primo treno, lo scostamento dopo l'interazione sarà il maggiore tra la perturbazione antecedente e quella propagata dal primo treno, senza che le stesse si sommino. La stabilità semplice è quindi sempre conseguita.

Per valutare l'annullamento della perturbazione entro fascia in un tempo finito, si noti che la traslazione alla seconda traccia imposta dal primo treno che viaggia al limite di fascia è  $(F + t_b) - S$ . Essendo  $S - t_b$  il margine di

threshold, must give impacts on other trains, already travelling at the threshold limit, that are reduced to small perturbations (i.e. in the range) within a finite propagation time.

Consider a timetable whose quality is measured on a punctuality threshold  $F$ , for an expected percentage of trains within threshold equal to  $P$ . A train whose delay at path end is greater than  $F$  will be considered late.

For simplicity, the probability density of train delay within the range can be assumed as uniform, for a cumulative probability across the entire range, from zero to the threshold value, equal to  $P^{(15)}$ . Trains are scheduled according to a design headway  $S$ , given by a blocking time  $t_b$  plus a buffer  $M^{(16)}$ .

If subsequent trains have the same punctuality threshold, it can be said that any delay of the first train within threshold does not impact on the second train in the following condition:  $S > F + t_b$ .

In fact, another train may follow the perturbed train just after blocking time is over (fig. 4a).

If instead  $S < F + t_b$ , the delay of the first train can have an impact on the second. By definition, however,  $S \geq t_b$ ; even in the extreme case of equality, i.e. the design headway does not include any buffer, the perturbation propagated to the second train can be at the most the one of the first train. Hence the following fundamental principle is valid: no perturbation within threshold of a train can carry the perturbed trains off the same threshold (fig. 4b). Major delays include minor delays, so that when the second train travels delayed for own reasons, not depending on the first train, the delay after interaction will be the greater between the previous perturbation and the one propagated by the first train, without the same adding up. Simple stability is therefore always achieved.

<sup>(15)</sup> In molti studi la densità di probabilità degli scostamenti è modellizzata con una distribuzione esponenziale negativa. Tuttavia essa presenta un massimo allo zero, il che non è in genere realistico, per cui sono state utilizzate altre distribuzioni più flessibili: soprattutto gamma, Weibull e log-normale. Per riprodurre distribuzioni misurate, che in genere contengono code abbastanza pronunciate, sono state utilizzate anche distribuzioni miste [13]. In mancanza di una base di dati sufficientemente numerosa o di un orientamento uniforme negli studi sull'argomento, si è scelta per questo approfondimento la descrizione più semplice, che spalmando uniformemente la densità di probabilità su tutta la fascia, ci si aspetta sovrastimi il numero di eventi presso termine fascia. Dal momento che sono i ritardi significativi a mettere in crisi la circolazione, non si ritiene che questa scelta di semplificazione possa essere problematica.

<sup>(16)</sup> L'interazione tra i treni avviene considerando il tempo di occupazione legato al treno antecedente – quanto a lungo un treno occupa una specifica sezione da quando vi entra con la testa a quando vi esce con la coda, più il tempo di riassetto delle apparecchiature tecnologiche – ed il tempo di approccio legato al treno seguente – quanto in anticipo rispetto all'entrata nella sezione il segnale che la protegge deve essere disposto a via libera affinché la marcia del treno in avvicinamento non sia perturbata. Assumendo che siano rispettivamente uguali per i treni in successione, si può considerare la loro somma – il tempo di bloccamento – senza ulteriore distinzione.

<sup>(15)</sup> In many studies the probability density of delays is modelled with a negative exponential distribution. However, it has a maximum at zero, which is typically not realistic; therefore other more flexible distributions have been used: especially gamma, Weibull and log-normal. To reproduce the measured distributions, which typically contain quite pronounced queues, mixed distributions were also used [13]. In the absence of a sufficiently large database or a uniform orientation in studies on the topic, the simplest description was chosen for this study. Spreading the probability density evenly across the entire range, the number of events close to the threshold is expected to be overestimated. Since traffic suffers mainly because of the larger delays, this choice of simplification should not be problematic.

<sup>(16)</sup> The interaction between subsequent trains occurs by the occupation time connected to the preceding train – how long a train occupies a specific section since when it enters with the head until it comes out with the tail, plus the reset time of the block system – and the approach time related to the following train – how much in advance before the train enters the section the main signal must be cleared so that the driver does not perceive any restrictive aspect. Assuming they are respectively equal for subsequent trains, we can consider their sum – the blocking time – without further distinction.

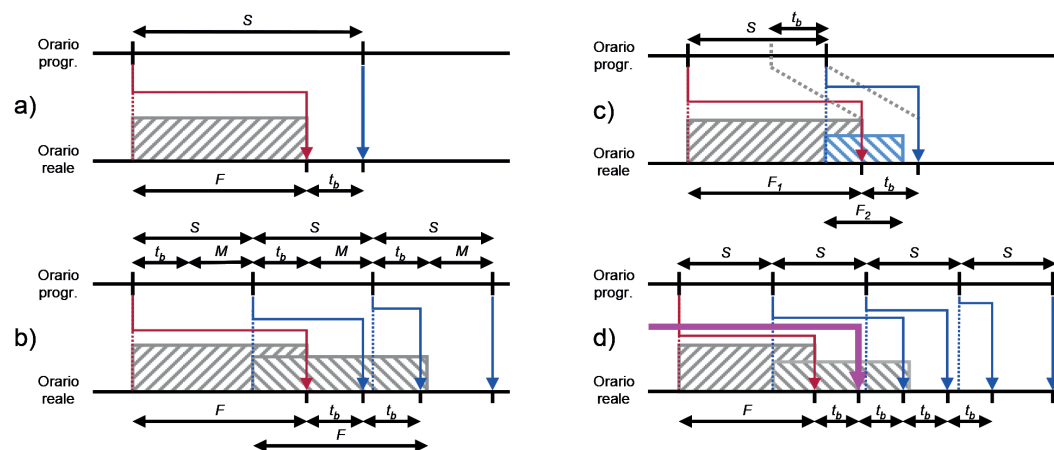


Fig. 4 - Schemi esplicativi della propagazione delle perturbazioni. In rosso il treno viaggiante a limite di fascia, in blu i treni che subiscono perturbazioni indotte ed il primo treno non perturbato, in magenta le circolazioni estranee. a) specifica minima per evitare perturbazioni indotte con treni viaggianti a limite di fascia; b) perturbazioni indotte da treni a fascia diversa; c) perturbazioni indotte tra treni a fascia diversa; d) assorbimento di una circolazione estranea.

Fig. 4 - Explanatory diagrams of perturbation propagation. Red arrow: train travelling at threshold limit. Blue arrow: trains suffering for induced perturbations and first non-perturbed train. Magenta arrow: extraneous train. a) Minimum schedule headway to avoid induced perturbations after trains travelling at threshold limit; b) perturbations induced by trains travelling at threshold limit never cause following trains to go beyond threshold; c) induced perturbations among trains with different thresholds; d) absorption of an extraneous train.

recupero introdotto nella specifica, il numero  $n$  di treni interferiti sarà<sup>(17)</sup>:

$$n = \lceil [F - (S - t_b)] / (S - t_b) \rceil = \lceil (F - M) / M \rceil$$

Risolviendo per  $M$ , il valore di margine  $(S - t_b)$  che permette di limitare ad  $n$  il numero di treni interferiti sarà pari a:

$$M = S - t_b = F / (n + 1)$$

In queste relazioni, specifica e tempo di bloccamento vengono eliminati e le grandezze legate sono unicamente margine, numero di treni interferiti e ampiezza della fascia di puntualità.

Così, procedendo ai calcoli numerici, per treni che viaggiano in fascia 5' le ripercussioni delle piccole perturbazioni al primo treno possono essere limitate a 1, 2 o 3 treni con l'introduzione di margini relativamente contenuti: 2'30", 1'40", 1'15" rispettivamente. Limitare la ripercussione a 1, 2, 3 treni per fasce di puntualità di 15' richiederebbe invece margini molto elevati (7'30", 5'00", 3'45"). Di converso, riportare ai 5' comuni i distanzamenti tra treni su sezioni di Blocco Automatico di lunghezza normale, con tempi di bloccamento dell'ordine di 2'30", corrisponde ad introdurre un margine di 2'30", e quindi a limitare le ripercussioni ad un unico treno (fig. 5a); per un treno che viaggia in fascia 15' sulla stessa linea e con la stessa speci-

To evaluate the absorption of the perturbation within threshold in a finite time, note that the translation to the second path set by the first train that travels at range limit is  $(F + t_b) - S$ . Being  $S - t_b$  the buffer time introduced in the design headway, the  $n$  number of interfered trains will be<sup>(17)</sup>:

$$n = \lceil [F - (S - t_b)] / (S - t_b) \rceil = \lceil (F - M) / M \rceil$$

Solving by  $M$ , the buffer time  $(S - t_b)$  that allows not to have more than  $n$  interfered trains will be:

$$M = S - t_b = F / (n + 1)$$

In these relationships, design headways and blocking time are deleted and the quantities involved are solely buffer, number of interfered trains and value of the punctuality threshold.

So, moving forward to numerical calculations, for trains travelling in the 5' threshold, small perturbations on the first train can cause no more than 1, 2 or 3 trains to get induced perturbations by the introduction of relatively low buffers: 2'30", 1'40", 1'15" respectively. Limiting the effect to 1, 2, 3 trains with punctuality ranges of 15' would require very high buffers instead (7'30", 5'00", 3'45"). Conversely, bringing headways back at 5', a common value on Automatic Block sections of normal length, where blocking times are in the order of 2'30", is the same as introducing a buffer of

<sup>(17)</sup> L'operatore  $\lceil \cdot \rceil$ , detto *operator ceiling*, è l'operatore di arrotondamento all'intero superiore.

<sup>(17)</sup> The operator  $\lceil \cdot \rceil$ , called *ceiling operator*, is the operator rounding to the first higher integer number.



fica, 3"00' di margine comportano ripercussioni su 4 treni della stessa categoria (fig. 5b). La perturbazione del treno a fascia 5' si esaurisce nei 10' successivi, la perturbazione del treno a fascia 15' si protrae per 25'.

Più critico il caso in cui l'orario prevede la successione di treni la cui puntualità è misurata su fasce diverse, in particolare con treni a fascia più ampia che precedono treni a fascia più ridotta (fig. 4c).

Nell'ipotesi di non potere variare la successione dei treni, se il treno 1 viaggia entro fascia  $F_1$  con uno scostamento maggiore di  $S + F_2 - t_b$ , allora il treno 2 viene spinto fuori fascia. Se la densità di probabilità dell'arrivo di 1, come ipotizzato, è costante entro  $F_1$ , allora la probabilità che l'evento avvenga ad un istante successivo a  $S + F_2 - t_b$  è pari a  $[F_1 - (S + F_2 - t_b)] / F_1$ , che per  $F_1 = 15'$ ,  $F_2 = 5'$ ,  $S = 5'$  e  $t_b = 2'30''$  è pari al 50%. Quindi è davvero alta la probabilità che un treno a fascia 5' a seguito di un treno a fascia 15' sia spinto fuori fascia.

Se il treno a fascia 15' viaggia a limite di fascia e il treno a fascia 5' è il primo di una batteria, i treni interferiti saranno:

$$n = \lceil [F_1 - (S - t_b)] / (S - t_b) \rceil = \lceil (F_1 - M) / M \rceil$$

e quelli spinti fuori fascia saranno:

$$n_{ff} = \lceil [F_1 - (S - t_b) - F_2] / (S - t_b) \rceil = \lceil (F_1 - M - F_2) / M \rceil$$

L'esempio, con  $n = 5$ ,  $n_{ff} = 3$  e una perturbazione protratta per 30' (fig. 5c), evidenzia l'effetto, particolarmente

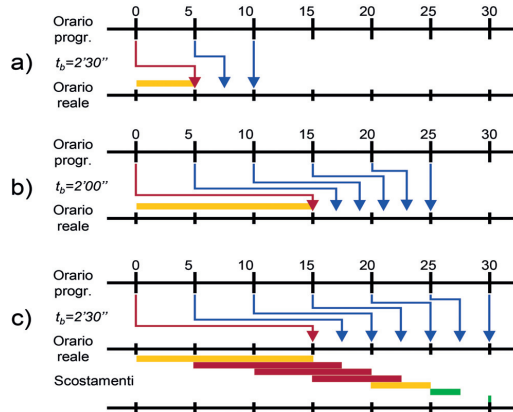


Fig. 5 - Esempi di perturbazioni indotte. In rosso il treno che viaggia a limite di fascia, in blu quelli che subiscono perturbazioni indotte ed il primo treno non perturbato. In rosso gli scostamenti fuori fascia, in giallo gli scostamenti a limite di fascia (comunque considerati in fascia), in verde gli scostamenti entro fascia.

Fig. 5 - Examples of induced perturbations. Red arrow: trains at threshold limit; blue arrow: trains suffering for induced perturbation and first non-perturbed train. Red bar: delays beyond threshold; yellow bar: delays at threshold limit (consider below threshold); green bar: delays below threshold.

2'30'', and therefore limiting the repercussions to a single train (fig. 5a); for a train that travels in the 15' range along the same line and with the same headway, buffer times of 3'00'' cause repercussions on 4 trains of the same category (fig. 5b). The perturbation of the trains measured in the 5' threshold ends in the following 10', the perturbation of the trains measured in the 15' threshold lasts for 25'.

More critical is the case in which trains whose punctuality is measured on different thresholds are scheduled one after the other, especially when higher-threshold trains precede trains with lower threshold (fig. 4c).

Assuming the possibility to vary the train sequence is not available, if train 1 travels within threshold  $F_1$  with a delay greater than  $S + F_2 - t_b$ , then train 2 is pushed off threshold. If the arrival probability density of train 1, as assumed, is constant within  $F_1$ , then the probability that the event will happen in a moment subsequent to  $S + F_2 - t_b$  is equal to  $[F_1 - (S + F_2 - t_b)] / F_1$ , that for  $F_1 = 15'$ ,  $F_2 = 5'$ ,  $S = 5'$  and  $t_b = 2'30''$  is equal to 50%. Therefore the probability that a 5'-threshold train following a 15'-threshold train is pushed off range is really high.

If the 15'-threshold train travels at threshold limit and the 5'-threshold train is the first of a set, the interfered trains will be:

$$n = \lceil [F_1 - (S - t_b)] / (S - t_b) \rceil = \lceil (F_1 - M) / M \rceil$$

and those pushed off range will be:

$$n_{ff} = \lceil [F_1 - (S - t_b) - F_2] / (S - t_b) \rceil = \lceil (F_1 - M - F_2) / M \rceil$$

The example, with  $n = 5$ ,  $n_{ff} = 3$  and a protracted perturbation for 30' (fig. 5 c), highlights the particularly detrimental effect, and suggests an opportunity to specialise lines and to adopt a single punctuality range.

Another timetable stability test is the ability of the same to sustain an unscheduled movement, i.e. a train scheduled in a previous timeslot and severely delayed. Considering the case with trains all measured in the same range, the insertion is possible by deriving from the buffers, in favour of the unscheduled train, an interval  $t_b$ . The number of perturbed trains,  $n$ , will vary between a minimum corresponding to the positioning after a train that accidentally travels without delay and a maximum corresponding to the positioning after a train at threshold limit (fig. 4 d):

$$n_{min} = \lceil (2t_b - S) / (S - t_b) \rceil$$

$$n_{max} = \lceil [F - (S - t_b) + t_b] / (S - t_b) \rceil = \lceil [F - S + 2t_b] / (S - t_b) \rceil$$

So, in the sample cases, with  $S = 5'$ ,  $t_b = 2'30''$ ,  $F = 5'$  or  $F = 15'$ , the number of perturbed trains varies between 0 and 2 in case of 5'-threshold trains and between 0 and 6 in the case of 15'-threshold trains. Trains off threshold will be respectively:

$$n_{ffmin} = \max(0; \lceil (2t_b - F - S) / (S - t_b) \rceil)$$

$$n_{ffmax} = \max(0; \lceil (2t_b - S) / (S - t_b) \rceil)$$

pesante, e suggerisce l'opportunità di specializzare le linee e di adottare un'unica fascia di puntualità.

Un'altra verifica della stabilità dell'orario è la capacità dello stesso di accogliere al suo interno una circolazione "estranea", cioè prevista in una fascia oraria precedente e fortemente ritardata. Considerando il caso con treni tutti misurati in una medesima fascia, l'inserimento è possibile ricavando dai margini, a favore del treno estraneo, un intervallo pari a  $t_b$ , ed il numero di treni perturbati,  $n$ , varierà tra un minimo corrispondente ad una collocazione forzata dopo un treno che contingentemente viaggia senza scostamenti ed un massimo corrispondente ad una collocazione dopo un treno ai limiti di fascia (fig. 4d):

$$n_{\min} = [(2t_b - S) / (S - t_b)]$$

$$n_{\max} = [(F - (S - t_b) + t_b) / (S - t_b)] = [(F - S + 2t_b) / (S - t_b)]$$

Così, nei casi di esempio, con  $S = 5'$ ,  $t_b = 2'30''$ ,  $F = 5'$  o  $F = 15'$ , il numero di treni perturbati varia tra 0 e 2 nel caso di treni con fascia  $5'$  e tra 0 e 6 nel caso di treni con fascia  $15'$ . I treni fuori fascia saranno rispettivamente pari a:

$$n_{\min} = \max(0; [(2t_b - F - S) / (S - t_b)])$$

$$n_{\max} = \max(0; [(2t_b - S) / (S - t_b)])$$

Quindi si hanno treni spinti fuori fascia per l'inserimento forzato di una traccia estranea solo se  $S < 2t_b$ , cioè se  $M < t_b$ . Questa considerazione dà un'indicazione importante ed utile sul dimensionamento della specifica, che potrebbe porsi al doppio del tempo di bloccamento, analoga alle specifiche attualmente adottate (tra  $5'$  e  $6'$ ). Tuttavia, la necessità di recuperare capacità sulle tratte più impegnate della rete richiede di ridurre i distanziamenti di progetto, seppur con effetti sulla puntualità.

Per il fatto che ritardi maggiori ricomprendono ritardi minori, l'orario con specifica doppia del tempo di bloccamento è in grado di assorbire circolazioni estranee tra ogni coppia di circolazioni programmate, anche di seguito, senza che i treni programmati escano di fascia. Ponendo una specifica di  $5'$ , con 12 circolazioni programmate all'ora, per un  $t_b$  di  $2'30''$ , sarebbero accoglibili 12 circolazioni estranee. Cioè, con una puntualità complessiva del 50%, i treni che non hanno subito le cause che hanno generato i ritardi non soffrirebbero oltre soglia. Rispetto agli obiettivi comuni per le reti ferroviarie, i valori di puntualità attesi sono oltre il 90%, per cui in un'ora è attesa appena più di una circolazione estranea. 11 intervalli  $t_b$  di margine sono quindi inutilizzati<sup>(18)</sup>.

Se  $S = t_b$ , vale il principio che nessun ritardo in fascia può generare ritardi fuori fascia, ma diventa impossibile

*Therefore, there are trains pushed off threshold due to forced insertion of an unscheduled path only if  $S < 2t_b$ , i.e. if  $M < t_b$ . This consideration gives an important and useful indication on the size of the design headways, which could be twice the blocking time, similarly to the design headway times usually adopted today (between  $5'$  and  $6'$ ). However, the need to have more available capacity on the busiest sections of the network requires smaller design headway times, albeit with effects on punctuality.*

*Due to the fact that major delays include minor delays, the timetable with design headways twice the blocking time can absorb unscheduled trains between each pair of programmed trains, even in sequence, without the scheduled trains going off threshold. With a design headway of  $5'$ , with 12-programmed trains each hour, for a  $t_b$  of  $2'30''$ , 12 unscheduled movements would be acceptable. That is, with an overall punctuality of 50%, trains that have not undergone the causes that have led to delays would not suffer over threshold. But the common objectives for railway networks expect punctuality values over 90%, that is in one hour just over one unscheduled train is expected. 11  $t_b$ -long buffer times are therefore unused<sup>(18)</sup>.*

*If  $S = t_b$ , the principle that no delay below threshold can generate delays off threshold is still valid, but no below-threshold delay can be reabsorbed. In this situation we can imagine to force an unscheduled train, with an immediate right of way, which to pass requires a  $t_b$  interval. If the previous train travels with a delay close to threshold limit, the inclusion of the unscheduled path will lead the next train off threshold; if the previous train is close to zero delay, it will not do so because the  $t_b$  necessary to the new train will be taken from the threshold amplitude. In particular, if the previous train travels with a delay between 0 and  $F - t_b$ , no train will go off threshold; with constant probability distribution between zero and threshold, the likelihood of this occurrence is  $1 - t_b / F$ .*

*With the example parameters there is a reasonable probability of this occurrence (50%), but at the end of the reference period, the additional  $t_b$  would not be recovered and the perturbation will seep into the next period, in which another additional unscheduled circulation event is expected.*

*We can thus think of introducing in the timeframe in which a single unscheduled trains is expected, a single buffer equal to  $t_b$  to absorb it, evenly distributed throughout the range, so as to have a new design headway equal to a  $h + t_b$  with  $h < t_b$  (for the example case,  $0.08 t_b$ ). Now, if the train before the unscheduled one has a delay in the  $[0; h + F - t_b]$  range, no train is pushed off threshold. The*

<sup>(18)</sup> In realtà sono utilizzati per riassorbire gli scostamenti generati dai treni entro fascia: non è una funzione poco importante, soprattutto alla luce della gestione delle interferenze, in quanto le specifiche di interferenza sono in genere più basse delle specifiche di distanziamento.

<sup>(18)</sup> Actually they are used to reabsorb perturbations generated by trains with delays below threshold: it is not a function of little importance, especially in the light of interference management, because interference constrain times are typically lower than design headway times.

qualsiasi riassorbimento delle perturbazioni entro fascia. In tale situazione si può immaginare di introdurre una circolazione estranea, con diritto di precedenza immediata, che richiede per svolgersi un intervallo  $t_b$ . Se il treno precedente viaggia con scostamento prossimo al limite di fascia, l'inserimento della traccia estranea porterà il treno successivo fuori fascia; se il treno precedente è prossimo allo scostamento nullo, non lo porterà, in quanto il  $t_b$  necessario al nuovo treno sarà ricavato dall'ampiezza di fascia. In particolare, se il treno antecedente viaggia con scostamento compreso tra 0 ed  $F - t_b$  nessun treno andrà fuori fascia; con distribuzione di probabilità costante all'interno della fascia, la probabilità che ciò avvenga è  $1 - t_b / F$ .

Con i parametri dell'esempio c'è una discreta probabilità che ciò accada (50%), ma al termine del periodo di riferimento, il  $t_b$  addizionale non sarebbe recuperato e la perturbazione si propagherebbe al periodo successivo, nel quale è da attendere un ulteriore evento di circolazione estranea.

Si può quindi pensare di introdurre nell'arco temporale in cui è attesa un'unica circolazione estranea un unico margine pari a  $t_b$ , per assorbita, spalmato uniformemente su tutti gli intervalli a specifica minima  $t_b$ , in modo da avere una nuova specifica pari a  $h + t_b$ , con  $h < t_b$  (nel caso di esempio,  $0,08 t_b$ ). Ora l'intervallo di scostamento del treno antecedente a quello estraneo che permette che nessun treno esca di fascia è  $[0; h + F - t_b]$  e la probabilità dell'evento favorevole è  $1 + (h - t_b) / F$ . Al termine del periodo di riferimento l'intervallo aggiuntivo dovuto alla circolazione estranea sarà assorbito, ma con probabilità  $(t_b - h) / F$  la puntualità del sistema sarà diminuita, perché almeno un ulteriore treno sarà uscito di fascia.

Tuttavia,  $h$ , da aggiungersi alla specifica, non può assumere qualsiasi valore, ma andrà quantificato in un  $j$  discreto che tiene conto del fatto che il valore di specifica può essere solo un multiplo intero di mezzo minuto. Applicando quindi una specifica  $S_e = t_b + j$  si ottiene un decremento di puntualità  $\Delta\pi$ , dipendente dalla puntualità originaria del sistema  $\pi_0$  secondo la formula:

$$\Delta\pi = \frac{1}{2} (1 - \pi_0) \cdot (t_b/j - 1) \cdot t_b / F$$

Il ragionamento che ha condotto a tale relazione è riportato in Appendice 2.

Con  $j = 30''$  ed  $F = 5'$  il decremento segue l'andamento di cui all'abaco di fig. 6 (superiore). Come si vede, il detrimento alla puntualità è in genere insostenibile. Applicando alternativamente specifiche  $S_e$  ed  $S_0 = 2t_b$ , dove  $S_0$  fornisce lo spazio per l'assorbimento della traccia estranea senza conseguenze successive, azzerandone perciò gli effetti, al verificarsi delle perturbazioni originarie, nel 50% dei casi, si avrà una probabilità  $(t_b - j) / F$  di spingere un unico treno fuori fascia, ottenendo nel complesso un decremento di puntualità:

$$\Delta\pi = (t_b - j) / 2F \cdot (1 - \pi_0)$$

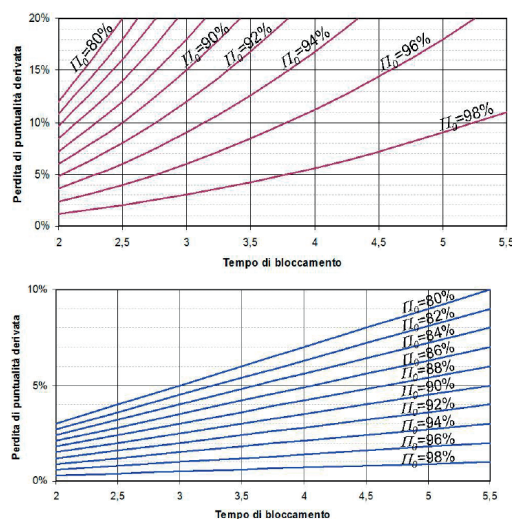


Fig. 6 - Perdita derivata di puntualità in fascia 5' rispetto alla puntualità originaria  $\pi_0$ , dovuta all'applicazione di una specifica pari a  $t_b + 30''$  (sopra) o all'alternanza di un'impostazione a specifica normale  $2t_b$  e di un'impostazione a specifica eccezionale  $t_b + 30''$  (sotto).

Fig. 6 - Derived punctuality loss in 5'-threshold, related to an original punctuality  $\pi_0$ , due to an uniform schedule headway  $t_b + 30''$  (above) or to an alternance of normal schedule headway  $2t_b$  and exceptional headway  $t_b + 30''$  (below).

likelihood of the favourable event is  $1 + (h - t_b) / F$ . At the end of the reference period, the additional interval due to the unscheduled circulation will be absorbed, but with probability  $(t_b - h) / F$  the punctuality of the system will be diminished, because at least one additional train will have gone off range.

However,  $h$ , to be added to the design headway, cannot take any value, but it will be quantified in a discreet  $j$  that takes into account the fact that the design headway value can only be an integer multiple of half a minute. Applying a design headway  $S_e = t_b + j$  results in a punctuality decrease  $\Delta\pi$ , dependent on the original system punctuality  $\pi_0$  according to the formula:

$$\Delta\pi = \frac{1}{2} (1 - \pi_0) \cdot (t_b/j - 1) \cdot t_b / F$$

The reasoning that has led to such relation is reported in Appendix 2.

With  $j = 30''$  and  $F = 5'$  the decrease follows the trend referred to in the abacus in fig. 6 (top). As we can see, the detriment to punctuality is generally intolerable. By applying alternatively design headways  $S_e$  and  $S_0 = 2t_b$ ,  $S_0$  provides space for the absorption of the unscheduled path without subsequent consequences, therefore zeroing the effects. Upon the occurrence of the original perturbations, in 50% of cases we will have a probability

Come indicato in fig. 6 (inferiore) si hanno decrementi di puntualità indotti sensibilmente più bassi ed in molti casi accettabili.

Si potrebbero quindi considerare *margini eccezionali*, pari a 30", utilizzabili con oculatezza e mai per più di due treni successivi, e *margini normali*, pari a  $t_b$ , utilizzabili sistematicamente.

Nel caso di linee con circolazione mista di treni in fascia 5' e treni in fascia 15', la tabella 3 mostra che valori di margine anche elevati comportano che, in ogni situazione di treno a fascia 15' che viaggia a limite di fascia, la circolazione dei treni a fascia 5' risulta fortemente deteriorata. Pertanto, in tali situazioni è opportuno provvedere in gestione operativa alla variazione della successione dei treni.

## 5. Conclusioni

Si è proposto un metodo per calcolare le specifiche di distanziamento per linee attrezzate con Blocco Automatico a correnti codificate e sezioni concatenate che permetta di aumentare le prestazioni dell'infrastruttura, specialmente per i casi di sequenze di treni in transito, disaggregando i valori generali tradizionalmente utilizzati ed adattandoli al contesto impiantistico.

I valori di specifica emersi dai ragionamenti sopra sviluppati sono riassunti nella tabella 4, dove ricomprendono anche i margini di regolarità, distinti in normali ed eccezionali.

Va evidenziato che i valori sono vicini, per le situazioni comuni, a quelli sintetici storicamente utilizzati; questo è particolarmente confortante, perché allinea la pratica consolidata a una trattazione teorica<sup>(19)</sup>. I valori tradizionali rispondono alla necessità di ricondurre a pochi parametri sintetici di applicazione le varie casistiche che si possono ottenere. Il metodo può quindi essere utilizzato come affinamento dei valori adottati, la cui validità è confermata, per le situazioni puntuali dove è necessario recuperare capacità.

Il metodo può essere riassunto in questi passaggi:

1. individuare la sezione di maggiore lunghezza della tratta (avendo cura di aumentare di 100 m l'ultima sezione prima delle località di servizio);

<sup>(19)</sup> Un'analisi degli orari di circolazione pubblicamente disponibili, incrociati ai dati dei Fascicoli Circolazione Linea, permette di ricavare le specifiche di normale applicazione dall'osservazione della circolazione programmata. Si verifica che in situazioni di sistemi di distanziamento a sezioni lunghe (circa 1800 m) le specifiche di distanziamento adottate sono di 6', in presenza di sezioni di lunghezza regolare (poco più di 1350 m) si adottano 5'30", in presenza di sistemi di distanziamento a sezioni corte si adottano valori di 4' in presenza di scansioni regolari e di 5' in presenza di situazioni con degrado (stazioni con radici "lunghe" o da percorsi in ogni caso a 30 km/h).

TABELLA 3 – TABLE 3

TRENI IN FASCIA 5' CHE ESCONO FUORI FASCIA A SEGUITO DI TRENI A FASCIA 15' VIAGGIANTI A LIMITE DI FASCIA, IN FUNZIONE DEI MARGINI IMPOSTI

5'-THR. TRAINS BEYOND THRESHOLD WHEN TRAVELLING AFTER 15'-THR. TRAINS TRAVELLING AT THRESHOLD LIMIT, DEPENDING ON BUFFER TIMES

Margine imposto Set buffer	Specifica risultante Resulting design headway	Treni fuori fascia <sup>(c)</sup> Trains off threshold <sup>(c)</sup>
1'	3½'	9
1½'	4'	6
2'	4½'	4
2½'	5'	3
3'	5½'	3
3½'	6'	2

<sup>(c)</sup> N° treni a fascia 5' fuori fascia a seguito di un treno a fascia 15' a limite di fascia; specifica risultante per  $t_b = 2'30''$ .  
<sup>(c)</sup> N° trains in 5' thr. following a train in 15' thr. at range limit; resulting design headway for  $t_b = 2'30''$

$(t_b - j) / F$  to push a single train off threshold, thus obtaining on the whole a decrease of punctuality:

$$\Delta\pi = (t_b - j) / 2F \cdot (1 - \pi_0)$$

As shown in fig. 6 (bottom) the derived punctuality decrease is significantly lower and acceptable in many cases.

We could therefore consider exceptional buffers of 30", to be used cautiously and for never more than two subsequent trains, and normal buffers equal to  $t_b$ , to be used systematically.

In the case of lines with mixed circulation of trains in 5'- and 15'-threshold, table 3 shows that even high buffer times imply that, in any situation with a 15'-threshold train travelling at threshold limit, the 5'-threshold train traffic is greatly deteriorated. Therefore, in these situations it is appropriate to vary the train succession by operational management.

## 5. Conclusions

A method for calculating the design headways on lines with BAcc block system and multiple-section signalling has been proposed, with the aim to increase the available infrastructure capacity, especially in the case of sequences of trains without stop, by disaggregating general values traditionally used and adapting them to the infrastructural context.

The design headways calculated from the arguments developed above are summarised in table 4, which also includes the buffer times, separated in normal and exceptional.

It should be highlighted that the values are close, for common situations, to the synthetic ones historically used; this is particularly reassuring, because it aligns the consoli-



TABELLA 4 – TABLE 4

VALORI DI SPECIFICA PROPOSTI PER LINEE ATTREZZATE CON BAcc  
 DESIGN HEADWAY TIMES PROPOSED FOR LINES EQUIPPED WITH BAcc

Tempi di specifica normali ed eccezionali in precedenza al treno di categoria indicata per linee con Blocco Automatico a Correnti Codificate, segnalamento concatenato e grado di frenatura fino al IV Normal and exceptional design headway before the indicated train category for lines with Encoded Block multiple-section signalling and braking degree up to IV																												
Per ogni velocità di linea e categoria di treno, la riga superiore indica le specifiche normali e quella inferiore le specifiche eccezionali per le lunghezze di sezione in corrispondenza. A seguito di treni merci con lunghezza maggiore o uguale a 500 m aggiungere 30" alla specifica. For each line speed and train category, the top line indicates the normal design headway, the lower line the exceptional design headway for the corresponding section length. After freight trains with a length greater than or equal to 500 m add 30".																												
Velocità di linea e velocità di impostazione del treno superiore a 110 km/h Line speed and train speed exceeding 110 km/h																												
Lunghezza di sezione [m] Section length [m]	900	950	1000	1050	1100	1150	1200	1250	1300	1350	1400	1450	1500	1550	1600	1650	1700	1750	1800	1850	1900	1950	2000	2050	2100	2150	2200	2250
Treni viaggiatori con velocità di impostazione superiore a 200 km/h [min] Passenger trains with speed greater than 200 km/h [min]		4'			4½'				5'		3½'		4'				4½'			5'				5½'			5½'	
		2½'					3'					2½'								3'							3½'	3½'
Treni viaggiatori con velocità di impostazione di 160 km/h [min] Passenger trains with speed of 160 km/h [min]	3½'	4'			4½'				5'			4'			4½'				5'				5½'				6'	
		2½'					3'					2½'							3'							3½'		
Treni viaggiatori con velocità di impostazione di 140 km/h [min] Passenger trains with speed of 140 km/h [min]		4'		4½'		5'		5½'			4½'		5'		5½'				5½'			6'				6½'		
		2½'				3'			3½'	2½'			3'						3½'								4'	
Treni merci con frenatura di tipo viaggiatori [min] Freight trains with passenger type braking [min]		6½'		7'		7½'		8'		6½'		7'		7½'		8'		8½'		8½'		9'		9½'		9½'		10'
	3½'		4'			4½'					4'				4½'						5'					5½'		
Treni merci con frenatura tipo merci [min] Freight trains with freight type braking [min]		7'		7½'		8'		8½'		9'		7½'		8'		8½'		9'			9½'		10'		10½'		11'	
		4'			4½'			5'			4'		4½'				5'				5½'					6'		
Per successioni di treni con fermata, aggiungere alla specifica 1'30" più il tempo di fermata previsto. For train sequences with stops, add 1'30" to the design headways plus the scheduled stopover time.																												
Velocità di linea o di impostazione del treno di 110 km/h Line speed or train speed of 110 km/h																												
Lunghezza di sezione [m] Section length [m]	900	950	1000	1050	1100	1150	1200	1250	1300	1350	1400	1450	1500	1550	1600	1650	1700	1750	1800	1850	1900	1950	2000	2050	2100	2150	2200	2250
Treni viaggiatori di lunghezza 400 m [min] Passenger trains with a length of 400 m [min]		3½'				4'					4½'			5'				5½'						6'			6½'	
		2'				2½'							3'										3½'					
Treni viaggiatori di lunghezza 250 m [min] Passenger trains with a length of 250 m [min]		3'		3½'			4'				4½'		5'		5½'				5½'					6'				
		2'				2½'							3'										3½'					
Treni merci con frenatura di tipo viaggiatori [min] Freight trains with passenger type braking [min]		6½'	7'		7½'		8'		7'		7½'		8'		8½'		8½'		9'		9½'		9½'		10'		10'	
	3½'		4'			4½'			4'			4½'							5'							5½'		
Treni merci con frenatura tipo merci [min] Freight trains with freight type braking [min]		7'		7½'		8'		8½'	9'		7½'		8'		8½'		9'			9½'		10'		10½'		11'		
		4'			4½'			5'		4'		4½'					5'					5½'				6'		
Per successioni di treni con fermata, aggiungere alla specifica il tempo di fermata previsto. For train sequences with stops, add the scheduled stopover time.																												
Velocità di linea o di impostazione del treno di 60 km/h Line speed or train speed of 60 km/h																												
Lunghezza di sezione [m] Section length [m]	900	950	1000	1050	1100	1150	1200	1250	1300	1350	1400	1450	1500	1550	1600	1650	1700	1750	1800	1850	1900	1950	2000	2050	2100	2150	2200	2250
Treni viaggiatori di lunghezza 400 m [min] Passenger trains with a length of 400 m [min]	5½'		6'		6½'		7'		7½'		8'		8½'		9'		9½'		10'		10½'		11'		11½'		12'	
		3½'				4'					4½'			5'					5½'							6'		
Treni viaggiatori di lunghezza 250 m [min] Passenger trains with a length of 250 m [min]		5'		5½'		6'		6½'		7'		7½'		8'		8½'		9'			9½'		10'		10½'			
		3'		3½'			4'				4½'				5'						5½'					6'		
Treni merci tutti [min] All freight trains [min]		6½'		7'		7½'		8'		8½'		9'		9½'		10'			10½'		11'				11½'			
	3½'		4'				4½'					5'						5½'				6'				6½'		
Per successioni di treni con fermata, aggiungere alla specifica il tempo di fermata previsto. For train sequences with stops, add the scheduled stopover time.																												

2. classificare il tipo di treno in precedenza al quale si sta cercando la specifica;
3. determinare il valore di specifica caratteristico da utilizzarsi, nella tipologia normale od eccezionale, desumendolo dalla tabella 4;
4. considerare il treno antecedente; se merci, analizzarne la lunghezza e valutare se va applicato il relativo incremento;
5. valutare se si sta considerando una successione di treni con fermata, aggiungendo il tempo di sosta programmato, incrementato o meno a seconda della velocità della linea;
6. determinare il valore di specifica normale od eccezionale.

La tabella riassuntiva con i valori di specifica è stata calcolata per un numero limitato di combinazioni di velocità massima del treno e della linea, percentuale di massa frenata, lunghezza del treno, ed in corrispondenza di un solo grado di frenatura.

Per sfruttare al meglio la capacità dell'infrastruttura, l'algoritmo di calcolo potrebbe essere inglobato direttamente negli strumenti elettronici di graficazione, per cui le specifiche di distanziamento non sarebbero più valutate come valore temporale, secondo la pratica attuale, ma sarebbero semplicemente ricavate dalla lunghezza della sezione di riferimento, dalle fiancate di linea e dai dati progettuali del treno. Il sistema ricaverebbe automaticamente tratta per tratta il distanziamento che ammette l'infrastruttura per gli specifici treni.

Si è inoltre evidenziata l'importanza dell'ottimizzazione della lunghezza delle sezioni ridotte e si è ipotizzata l'adozione dei margini eccezionali quale strumento per conseguire miglioramenti in termini di capacità programmabile, seppur a scapito della puntualità del sistema.

#### APPENDICE 1

##### **Determinazione dei tempi di bloccamento e proporzione tra i diversi contributi**

Il tempo di bloccamento è dato dalla somma degli addendi indicati al paragrafo 2 e, per treni viaggianti alla velocità di impostazione riportata, assume i valori indicati in tabella 5.

La fig. 7, relativa al caso delle velocità caratteristiche di tabella 1, mostra che il peso relativo degli addendi è abbastanza uniforme nelle diverse situazioni, con variazioni contenute entro il 10%. Si evidenzia sempre una netta prevalenza del tempo per la percorrenza delle sezioni libere, il cui contributo non scende mai sotto la metà del valore totale.

Il contributo del tempo di scorrimento è significativo solo per i treni merci, e solo se essi sono effettivamente di lunghezza considerevole. Come indicazione generale, sulla base di un'aggregazione delle diverse situazioni, si propone di introdurre un supplemento di specifica di 30" in ogni caso a seguito di treni di lunghezza superiore a 500 m.

*dated practice to a theoretical discussion<sup>(19)</sup>. Traditional values meet the need to trace back the various cases that can be obtained to a few synthetic application parameters. The proposed method can therefore be used as a refinement of the values adopted, whose validity is confirmed, for specific situations where capacity must be enhanced.*

*The method can be summarised in the following steps:*

1. *identify the longer section of the stretch (taking care to increase by 100 m the last section before the stations);*
2. *classify the train type before which the design headway is being sought;*
3. *determine the characteristic design headway to be used, in the normal or exceptional typology, deducing it from table 4;*
4. *consider the previous train; if it is a freight train, analyse its length and evaluate if the related supplement must be applied;*
5. *assess whether you are considering a succession of trains with stop, adding the scheduled stopover time, increased or less depending on the line speed;*
6. *determine the normal or exceptional specific design headway value.*

*The summary table with design headways was calculated for a limited number of combinations of maximum train and line speed, braked mass percentage, train length, and at only one degree of braking.*

*To maximize the infrastructure capacity, the calculation algorithm may be incorporated directly into the electronic timetable design tools, whereby the design headways would no longer be provided as a time value, according to current practice, but would be simply derived from the length of the reference section, from the line speed limits and from the design data of the train. The system would automatically derive the headway allowed for the specific trains, stretch by stretch.*

*The importance of optimising the length of short sections was also highlighted; the adoption of exceptional buffers as a mean to achieve improvements in terms of programmable capacity, albeit at the expense of punctuality, was suggested.*

#### APPENDIX 1

##### **Determination of blocking times and proportion between different contributions**

*The blocking time is given by the sum of the addends re-*

<sup>(19)</sup> An analysis of publicly available circulation timetables, cross-checked with data of Route Books, allows to back-calculate the traditional design headways. It occurs that in situations of block systems with long sections (approx. 1800 m) the design headway adopted is 6', with regular-length sections (just over 1350 m) 5' 30" are adopted, with short section the value of 4' is adopted in the presence of regular scans and 5' in the presence of situations with degradation (stations with "long" switch areas or paths to be travelled in every case at 30 km/h).

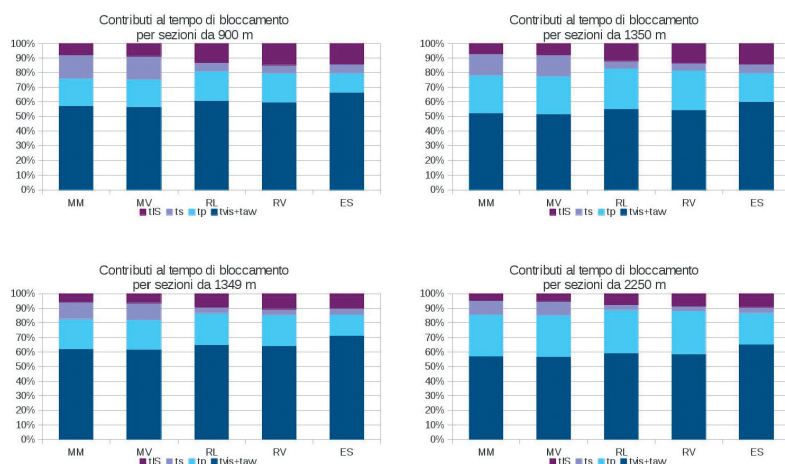


Fig. 7 - Peso relativo degli addendi del tempo di bloccamento.  
Fig. 7 - Relative weight of blocking time components.

Si possono sintetizzare le informazioni in relazione alla lunghezza effettiva di sezione per la determinazione delle specifiche tenendo conto di quanto segue:

- le specifiche di circolazione sono usualmente fornite mediante valori arrotondati a minuti interi e mezzi minuti; pertanto le differenziazioni nei tempi di bloccamento inferiori a 15" possono essere trascurate;
- è bene considerare che la condotta non avvenga esattamente alla velocità di impostazione, ma ad una velocità più bassa del 5%<sup>(20)</sup>.

Mediante interpolazioni, arrotondamenti ed alcune aggregazioni, si ricava quindi l'abaco di tabella 4. I tempi di bloccamento sono caso per caso la metà delle specifiche normali.

## APPENDICE 2

### Determinazione del decremento di puntualità connesso all'applicazione di specifiche ridotte

Si abbia un sistema con treni distanziati a specifica  $S_e$ , data dalla somma del tempo di bloccamento  $t_b$  e di un incremento  $j$ . La forzatura di una circolazione estranea nella successione di treni distanziati a specifica comporta

ferred to in paragraph 2 and, for trains travelling at the reported cruise speed, assumes the values shown in table 5.

Fig. 7 on the cases of the characteristic speeds in table 1 shows that the relative weight of the addends is quite uniform in different situations, with variations not higher than 10%. There is always a clear prevalence of the time to travel the approach sections, whose contribution never goes below half of the total value.

The contribution of the clearing time is significant only for freight trains, and only if they are actually of considerable length. As a general rule, based on an

aggregate of various situations, it is suggested to introduce a headway supplement of 30" after trains longer than 500 m.

The information in relation to the actual length of the section can be summarised taking the following into account:

1. design headways are usually supplied as values rounded to whole minutes and half minutes; therefore, differentiation in blocking times of less than 15" can be disregarded;
2. It is useful to consider that trains do not run exactly at the cruise speed set, but at a rate lower than 5%<sup>(20)</sup>.

Using interpolation, rounding and some aggregates, the abacus in table 4 is therefore derived. Blocking times are, case by case, half of normal design headways.

## APPENDIX 2

### Determination of the decrease in punctuality connected to the application of reduced headways

A timetable with trains distanced at a design headway  $S_e$  given by the sum of the blocking time  $t_b$  and an increase

<sup>(20)</sup> In relazione a tale scelta, è interessante il contributo di MEDEOSSI, LONGO e DE FABRIS [3], che hanno compiuto un'estesa campagna di misurazioni del diagramma di marcia di treni regionali, determinando, per ciascuna fase del moto (accelerazione, crociera, deriva, frenatura) le distribuzioni reali dei cosiddetti parametri di prestazione, corrispondenti in genere ad una frazione delle possibilità dinamiche nell'interazione veicolo-infrastruttura. Mediante tali risultati è possibile una calibrazione dei modelli utilizzati per la redazione delle tabelle di percorrenza. In relazione alla velocità di crociera, la distribuzione utilizzata è una distribuzione PERT con media 96,2.

<sup>(20)</sup> In relation to such a choice, MEDEOSSI, LONGO and DE FABRIS paper is interesting [3]. The authors have completed an extensive speed measurement campaign on regional trains, detailing each phase of motion (acceleration, cruise, coasting, braking) and obtaining the real distributions of the so called performance parameters, typically corresponding to a fraction of the dynamic possibilities in vehicle-infrastructure interaction. With these results, a calibration of the running times calculation models used in the scheduling process is possible. In relation to the cruising speed, the best distribution found is a PERT distribution with an average of 96.2.

TABELLA 5 – TABLE 5

TEMPO TOTALE DI BLOCCAMENTO IN FUNZIONE DELLA LUNGHEZZA DI SEZIONE PER LINEE IN BAcc  
TOTAL BLOCKING TIME RELATED TO SECTION LENGTH FOR BAcc-EQUIPPED LINES

Categoria treno Train id.	MM		MV		RL		RV		ES		MM		MV		RL		RV		ES	
Velocità di impostazione Cruise speed [km/h]	90	100	140	110	160	110	230	110	90	100	140	110	160	110	230	110	230	110	230	110
Codice di via libera di riferimento Reference clear line code	270	270	270	180	270	180	270*	180	270	270	270	180	270	180	270*	180	270*	180	270*	180
Lunghezza sezioni [m] Section length [m]	sez. 1350÷2250 m									sez. 900÷1349 m										
N. sez. necessarie libere No. of clear section needed	2	2	2	1	2	1	3	1	3	3	3	1	3	1	5	1	5	1	5	1
Distanza del codice di via libera di riferimento dal segnale a via impedita [m] Distance of the reference clear line code from stop signal [m]	2700 ÷ 4500	2700 ÷ 4500	2700 ÷ 4500	1350 ÷ 2250	2700 ÷ 4500	1350 ÷ 2250	4050 ÷ 6750	1350 ÷ 2250	2700 ÷ 4047	2700 ÷ 4047	2700 ÷ 4047	900 ÷ 1349	2700 ÷ 4047	900 ÷ 1349	4500 ÷ 6745	900 ÷ 1349	4500 ÷ 6745	900 ÷ 1349	4500 ÷ 6745	900 ÷ 1349
Tempo di percorrenza delle sezioni libere alla velocità di impostazione ( $t_{vis} + t_{avv}$ ) [s] Travel time of clear sections at cruise speed ( $t_{vis} + t_{avv}$ ) [s]	108 ÷ 180	97 ÷ 162	69 ÷ 116	51 ÷ 81	61 ÷ 101	51 ÷ 81	63 ÷ 106	51 ÷ 81	108 ÷ 162	97 ÷ 146	69 ÷ 104	36 ÷ 51	61 ÷ 91	36 ÷ 51	70 ÷ 106	36 ÷ 51	70 ÷ 106	36 ÷ 51	70 ÷ 106	36 ÷ 51
Tempo di percorrenza della sezione alla velocità di impostazione $t_p$ [s] Travel time of the section at cruise speed $t_p$ [s]	54 ÷ 90	49 ÷ 81	35 ÷ 58	44 ÷ 74	30 ÷ 51	44 ÷ 74	21 ÷ 35	44 ÷ 74	36 ÷ 54	32 ÷ 49	23 ÷ 35	29 ÷ 44	20 ÷ 30	29 ÷ 44	14 ÷ 21	29 ÷ 44	14 ÷ 21	29 ÷ 44	14 ÷ 21	29 ÷ 44
Tempo di scorrimento del treno alla velocità di impostazione $t_s$ [s] Clearing time of the train at cruise speed $t_s$ [s]	30	27	6	8	6	8	6	13	30	27	6	8	6	8	6	13	30	27	6	13
Tempo di manovra delle apparecchiature di segnalamento $t_{is}$ [s] Block system release time $t_{is}$ [s]	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
Tempo totale di blocco $t_b$ [s] Total blocking time $t_b$ [s]	207 ÷ 315	187 ÷ 285	125 ÷ 195	118 ÷ 177	111 ÷ 172	118 ÷ 177	105 ÷ 162	123 ÷ 182	189 ÷ 261	171 ÷ 236	114 ÷ 160	89 ÷ 118	101 ÷ 142	89 ÷ 118	105 ÷ 147	94 ÷ 123	105 ÷ 147	94 ÷ 123	105 ÷ 147	94 ÷ 123

un numero di treni perturbati pari a  $t_b/j$ : la perturbazione non si estingue se  $j = 0$  e per  $j > 0$  si riduce in ragione di  $j$  per ogni successivo treno perturbato.

La possibilità che la circolazione estranea inneschi una perturbazione che porta il primo treno perturbato fuori fascia è legata allo scostamento contingente del treno antecedente la circolazione estranea, supposto comunque circolante entro fascia. Se esso circola con uno scostamento compreso tra  $F + j - t_b$  ed  $F$  il primo treno perturbato esce di fascia. Nell'ipotesi di densità di probabilità uniforme tra 0 ed  $F$  dello scostamento

$j$ , is assumed. Forcing an unscheduled circulation in the succession of trains distanced at design headway implies a number of perturbed trains equal to  $t_b/j$ : the perturbation does not cease if  $j = 0$  and for  $j > 0$  it is reduced by  $j$  for each subsequent perturbed train.

The possibility that the unscheduled path triggers a perturbation that pushes the first perturbed train off threshold is linked to the accidental delay of the train (supposed circulating within delay below threshold) preceding the unscheduled train. If the preceding trains runs with a delay



del treno antecedente<sup>(21)</sup>, la probabilità che tale evento accada<sup>(22)</sup> è  $(t_b - j) / F$ . Ogni successivo treno vede diminuita la propria possibilità di essere spinto fuori fascia di  $j / F$ , in quanto i treni originariamente impostati a specifica  $S_e = j + t_b$  si distanzieranno a  $t_b$ . Pertanto la probabilità di uscita di fascia di ciascun treno  $n$ -esimo successivo alla circolazione estranea è  $P_n = (t_b - n \cdot j) / F$ .

Sia  $n_{\max}$  il massimo numero di treni spinti fuori fascia in conseguenza ad un singolo evento di circolazione estranea da assorbire. Essendo nulla la probabilità di un evento in più,  $P_{n_{\max}+1} = 0$  e quindi  $n_{\max} = t_b/j - 1$ ; essi, diventati a loro volta grandi perturbazioni, richiedono per essere assorbiti lo spazio ricavato da un numero di circolazioni pari a  $N'_{\text{ass}} = n_{\max} \cdot t_b / j$ . Dovendo assorbire anche l'evento scatenante serviranno  $N_{\text{ass}}$  circolazioni, con  $N_{\text{ass}} = N'_{\text{ass}} + 1 \cdot t_b / j = (n_{\max} + 1) \cdot t_b / j$ , prima che si possa avere la certezza di essere in grado di assorbire gli effetti di un'altra grande perturbazione. A seguito dell'evento scatenante, il caso in cui si verifica la conseguenza a massimo numero di treni fuori fascia è quello in cui la circolazione antecedente l'estranea viaggia con scostamento tra  $F - j$  ed  $F$ . La probabilità è  $P_{n_{\max}} = j / F$ . Riportandosi alla probabilità unitaria, ciò succede ogni  $F / j$  eventi, e quindi ogni  $N = F / j \cdot N_{\text{ass}}$  circolazioni<sup>(23)</sup>. Nello svolgersi di tale numero di circolazioni, la probabilità che si abbiano  $n_{\max-k}$  treni fuori fascia e non di più è, per qualsiasi  $k$ ,  $P_{n_{\max-k}} - P_{n_{\max-k+1}} = j / F$ , che è a sua volta uguale a  $P_{n_{\max}}$ . Cioè, ogni  $N = F \cdot t_b^2 / j^3$ , si ha in contemporanea probabilità unitaria per ciascun numero intero di treni fuori fascia conseguenti fino a  $n_{\max}$ . Quindi, in  $T = N \cdot (t_b + j)$  minuti si ha un numero di treni fuori fascia conseguenti complessivi pari alla somma degli interi tra 1 ed  $n_{\max}$ , che, mediante la formula di Gauss, è:

$$n_{\text{ff}} = \frac{1}{2} n_{\max} (n_{\max} + 1) = \frac{1}{2} (t_b/j) \cdot (t_b/j - 1)$$

Questo numero di treni fuori fascia conseguenti complessivi si verifica per un numero di eventi scatenanti pari al numero  $n_{\max}$ . Essi sono però solo una quota dei treni originariamente fuori fascia  $n_{\text{ff}}^{\text{rif}}$  - le circolazioni estranee -, in quanto solo con probabilità  $(t_b - j) / F$  la circolazione estranea arrecava dei danni. Perciò  $n_{\max}$  eventi scatenanti, che comportano  $n_{\text{ff}}$  eventi conseguenti, sono dati da  $n_{\text{ff}}^{\text{rif}} = n_{\max} \cdot F / (t_b - j)$  treni originariamente fuori fascia.

Pertanto, detta  $\pi_0$  la puntualità originaria del sistema, che crea  $n_0 = N \cdot (1 - \pi_0)$  treni fuori fascia ogni  $N$  circolazioni, il decremento di puntualità sarà pari a:

$$\Delta\pi = \pi_0 - \pi = n_{\text{ff}} / n_{\text{ff}}^{\text{rif}} \cdot n_0 / N = \frac{1}{2} (1 - \pi_0) \cdot (t_b/j - 1) \cdot t_b / F$$

between  $F + j - t_b$  and  $F$  the first perturbed train goes off threshold. Assuming the delay of the preceding train has an uniform probability density between 0 and  $F$ <sup>(21)</sup>, the likelihood of such an occurrence<sup>(22)</sup> is  $(t_b - j) / F$ . Each subsequent train has a probability of being pushed off threshold diminished by  $j / F$ , since trains originally designed with  $S_e = j + t_b$  headway will proceed at  $t_b$  headway. Therefore the probability of the  $n$ -th train to go off threshold because of an unscheduled path is  $P_n = (t_b - n \cdot j) / F$ .

Be it  $n_{\max}$  the maximum number of trains pushed off threshold due to a single occurrence of unscheduled path. Since there is zero probability of an extra event,  $P_{n_{\max}+1} = 0$  and therefore  $n_{\max} = t_b/j - 1$ ; those trains, having in turn become large perturbations, require to be adsorbed the space taken by a number of scheduled trains  $N'_{\text{ass}} = n_{\max} \cdot t_b / j$ . Having to absorb even the triggering occurrence,  $N_{\text{ass}}$  scheduled trains will be necessary, with  $N_{\text{ass}} = N'_{\text{ass}} + 1 \cdot t_b / j = (n_{\max} + 1) \cdot t_b / j$ , before being certain of being able to absorb the effects of another great perturbation. After the triggering event, the maximum number of trains off threshold happens when the train scheduled before the unscheduled one travels with a delay between  $F - j$  and  $F$ . The probability is  $P_{n_{\max}} = j / F$ . By relating to the unitary probability, this happens every  $F / j$  occurrences, that is every  $N = F / j \cdot N_{\text{ass}}$  scheduled trains<sup>(23)</sup>. As this number of trains takes place, the probability of having  $n_{\max-k}$  trains off threshold and no more is, for any  $k$ ,  $P_{n_{\max-k}} - P_{n_{\max-k+1}} = j / F$ , that in turn is equal to  $P_{n_{\max}}$ . That is, each  $N = F \cdot t_b^2 / j^3$ , we have at the same time a unitary probability for each integer number of induced trains off threshold up to  $n_{\max}$ . Therefore, in  $T = N \cdot (t_b + j)$  minutes there is a total number of induced trains off threshold equal to the sum of the integers between 1 and  $n_{\max}$ . Using the Gauss formula:

$$n_{\text{ff}} = \frac{1}{2} n_{\max} (n_{\max} + 1) = \frac{1}{2} (t_b/j) \cdot (t_b/j - 1)$$

This overall number occurs for  $n_{\max}$  triggering events. They are however only a share of the trains originally off range  $n_{\text{ff}}^{\text{rif}}$  - unscheduled trains - because only with probability  $(t_b - j) / F$  the unscheduled path causes damage. Thus  $n_{\max}$  triggering events, involving  $n_{\text{ff}}$  consequent events, are given by  $n_{\text{ff}}^{\text{rif}} = n_{\max} \cdot F / (t_b - j)$  trains originally off range.

Therefore, the original system punctuality  $\pi_0$  creates  $n_0 = N \cdot (1 - \pi_0)$  trains off threshold every  $N$  scheduled trains, that induce a punctuality decrease equal to:

$$\Delta\pi = \pi_0 - \pi = n_{\text{ff}} / n_{\text{ff}}^{\text{rif}} \cdot n_0 / N = \frac{1}{2} (1 - \pi_0) \cdot (t_b/j - 1) \cdot t_b / F$$

<sup>(21)</sup> Risultati simili sono stati ottenuti anche con una più realistica distribuzione esponenziale negativa degli scostamenti [14].

<sup>(22)</sup> Si supponrà sempre  $F \geq (t_b - j)$ .

<sup>(23)</sup> Non volendo ammettere la sovrapposizione fra gli effetti di eventi scatenanti distinti, è ovviamente l'evento estremo a determinare l'ampiezza delle finestre per l'assorbimento.

<sup>(21)</sup> Similar results were obtained also with a more realistic negative exponential distribution of delays [14].

<sup>(22)</sup>  $F \geq (t_b - j)$  will always be assumed.

<sup>(23)</sup> Not wanting to admit the overlap between the effects of different triggering events, is obviously the extreme event that determines the length of the interval needed for absorption.

Quanto descritto equivale a considerare un sistema con specifica originaria  $S_0 = 2t_b$  e puntualità originaria  $\pi_0$  che è stato portato ad una specifica  $S_e = t_b + j$  ed ha quindi aumentato il numero di tracce, da  $C = 60/2t_b$  a  $C\eta = 60 / (t_b + j)$ , con  $\eta = 2t_b / (t_b + j)$ . La puntualità risultante  $\pi$  sarà degradata a motivo degli ulteriori treni fuori fascia conseguenti, che si aggiungono a quelli fuori fascia originari.

Introducendo invece l'alternanza tra specifiche normali e specifiche eccezionali, la capacità del sistema sarà portata da  $C = 60/2t_b$  a  $C\mu$ , con  $\mu = 1/2 + t_b/(t_b + j)$ ; ad esempio, per  $t_b = 2'30''$  e  $j = 30''$ , da 12 a 16 tracce all'ora. Allora, al verificarsi delle perturbazioni originarie, nel 50% dei casi, corrispondenti alla proporzione di specifiche ridotte, si avrà una probabilità  $(t_b - j) / F$  di spingere un treno fuori fascia, per:

$$\Delta\pi = \pi_0 - \pi = (t_b - j) / 2F \cdot (1 - \pi_0)$$

Non ci sarà più di un unico treno fuori fascia per evento, perché la specifica normale dopo il treno successivo è in grado di fermare la perturbazione.

What described is like considering a system with original design headway  $S_0 = 2t_b$  and original punctuality  $\pi_0$  which was brought to a design headway  $S_e = t_b + j$  and has thereby increased the number of paths, from  $C = 60/2t_b$  to  $C\eta = 60 / (t_b + j)$ , with  $\eta = 2t_b / (t_b + j)$ . The resulting punctuality  $\pi$  will be degraded because of the additional induced trains off threshold, in addition to the ones originally off threshold.

Introducing instead the alternation between normal and exceptional design headways, the system capacity will be brought from  $C = 60/2t_b$  to  $C\mu$ , with  $\mu = 1/2 + t_b/(t_b + j)$ ; for example, for  $t_b = 2'30''$  and  $j = 30''$ , from 12 to 16 paths per hour. Then, upon the occurrence of original perturbations, in 50% of cases, corresponding to the proportion of exceptional headways, we will have a probability  $(t_b - j) / F$  of pushing a train off threshold, by:

$$\Delta\pi = \pi_0 - \pi = (t_b - j) / 2F \cdot (1 - \pi_0)$$

There will be no more than one train off threshold per event, because the normal headway after the next train is capable of ceasing the perturbation.

## BIBLIOGRAFIA – REFERENCES

- [1] Rete Ferroviaria Italiana, "Prospetto Informativo della Rete", dicembre 2012, par. 1.10.
- [2] MEDEOSSI G., LONGO G., DE FABRIS S., "A method for using stochastic blocking times to improve timetable planning", Journal of Rail Transportation Planning & Management, Volume 1, Issue 1, november 2011, pp.1-13.
- [3] Union Internationale des Chemins de fer, "Fiche 406 Capacité", 2ª edizione, gennaio 2012.
- [4] Agenzia Nazionale per la Sicurezza delle Ferrovie, "Regolamento sui Segnali", 1947 e ss.mm.ii., art. 49.1.
- [5] GENOVESI P., RONZINO C.D., "Flussi e capacità delle linee ferroviarie a doppio binario", Ingegneria Ferroviaria, luglio-agosto 2006.
- [6] Ministero dei Trasporti, "Norme per l'Ubicazione e l'Aspetto dei Segnali", 1981 e ss.mm.ii., art. 5.1.2.
- [7] *Ibid.*, art. 3.2.1.
- [8] Rete Ferroviaria Italiana, "Prefazione Generale all'Orario di Servizio", 1963 e ss.mm.ii..
- [9] Agenzia Nazionale per la Sicurezza delle Ferrovie, "Norme per l'Esercizio delle Apparecchiature Tecnologiche", Vol. II delle "Norme per la Circolazione dei Rotabili", 2008 e ss.mm.ii..
- [10] Rete ferroviaria Italiana, "Applicazione dell'SCMT: caratteristiche di codifica zone degli impianti di BAcc ed integrazioni tecnico normative", Nota della Direzione Tecnica di RFI 1428 del 30/10/03, recepita dall'Agenzia Nazionale per la Sicurezza delle Ferrovie tra le Prescrizioni dell'All. B al Decreto ANSF 1/2009.
- [11] RONZINO C.D., SIGNORETTI C., "Distanza fra i segnali: un approccio multidisciplinare fra tecnica della circolazione ed ergonomia di condotta", La Tecnica Professionale, giugno 2012.
- [12] HANSEN I.A., PACHL J., "Railway Timetable & Traffic", Eurail Press, Hamburg, 2008, pp. 130-132 e 155-169.
- [13] HANSEN, op. cit., pp. 173-174.
- [14] VAGHI E., "La determinazione dei margini di regolarità nelle specifiche di orario", SEF13, Sicurezza ed Esercizio Ferroviario, Atti del 3° Convegno Nazionale, Roma, 2013, pp. 87-96.