



Nuovo metodo di analisi dei ritardi e valutazione del “performance regime”

Prof. Ing. Giorgio SALERNO^(*), Dott. Ingg. Luigi COSTALLI^(*), Pier Luigi GUIDA^(**)

SOMMARIO – Tra i temi che sono al centro dell’attenzione in ambito ferroviario, il controllo andamento treni e la relativa quantificazione economica (“performance regime”) assumono sempre più rilevanza per le importanti implicazioni gestionali ed economiche che ne derivano. In questo lavoro si presenta un metodo formale per l’analisi della circolazione che consente l’attribuzione delle cause e la corretta quantificazione delle responsabilità dei ritardi lungo l’intera catena degli eventi. Si può ottenere così l’adeguata base quantitativa per la valutazione del servizio e per le opportune valorizzazioni economiche nell’ambito del performance regime.

1. Introduzione

Il presente lavoro presenta un metodo originale per l’analisi dei ritardi, proponendo un modo operativo idoneo ad avere nuove applicazioni nel campo in oggetto, con particolare riguardo ad una delle funzioni essenziali del Gestore Infrastruttura (GI): il tradizionale “controllo andamento treni”, più modernamente definito “performance regime” (attribuire le cause di ritardo fra i vari soggetti del trasporto ferroviario, imprese ferroviarie e lo stesso GI).

Il processo di analisi della qualità della circolazione su di una linea non può limitarsi alla semplice registrazione dei ritardi maturati dai singoli treni che hanno circolato in uno scenario. Perché tale procedura possa considerarsi completa, essa dovrà consentire di risalire agli eventi che hanno provocato ogni singola irregolarità.

Alla base del metodo vi è l’idea che la responsabilità per il ritardo maturato da un treno non sia automaticamente attribuibile al treno stesso, ma che una parte del ritardo (o tutto) possa essere causato da uno o diversi altri treni che ne hanno condizionato la circolazione. Si definisce componente *endogena* quella parte riconducibile a responsabilità del treno stesso e componente *esogena* quella dovuta all’interazione con gli altri treni.

In questo lavoro si presenta una metodologia che consente:

1. di separare le componenti endogene ed esogene;
2. di analizzare le interazioni tra tutti i treni che circolano in ogni singola tratta ed in ogni singolo impianto della linea;
3. di ricomporre l’intera catena degli eventi per assegnare la quota parte di ritardo esogeno all’evento origine della anomalia.

Il metodo proposto realizza una “lettura” della circolazione “così come avvenuta”, sulla sola base degli scostamenti rispetto all’orario teorico (in assenza di altri dati rilevati dal campo) e basandosi su alcune logiche di carattere generale. Resta affidata ad un’analisi indipendente la possibilità di rilevare cause esterne che abbiano influenzato la marcia di un treno, quali, ad esempio, un’anomala situazione meteorologica o condizioni particolari sulla linea, ovvero uno specifico evento perturbatore attribuibile all’infrastruttura o ad un convoglio di una impresa ferroviaria (IF).

Si precisa che nell’esposizione che segue il termine “ritardo” verrà utilizzato in modo non sempre rigoroso, intendendo a volte il ritardo effettivo, ossia lo scostamento rispetto all’orario teorico di un treno in un dato momento ed in un dato punto del sistema, a volte la “variazione del ritardo” verificatasi in un impianto o in una tratta specifica (il contesto rende evidente il significato da attribuire di volta in volta, mentre l’uso rigoroso avrebbe reso l’esposizione involuta, senza aumentarne la precisione in modo sostanziale).

^(*) Dipartimento di Ingegneria Civile di Firenze.

^(**) Direzione ICT – RFI Roma.

Il metodo verrà illustrato tramite diversi esempi puntuali e con l'applicazione di esso ad un caso non banale, costruito ad hoc, e ad un caso reale, tratto dalla base di dati aziendale RIACE⁽¹⁾ dell'R.F.I., relativo alla circolazione su di una linea di un caso campione.

2. Convenzioni e notazione

Al fine di facilitare l'interpretazione dei simboli, si sono adottate alcune regole per la loro formazione.

- Con lettere maiuscole si sono indicati gli intervalli di tempo e con lettere minuscole gli istanti.
- Le grandezze relative agli arrivi sono indicate con un apice, mentre quelle relative alle partenze con un doppio apice; ad esempio, lo scostamento in arrivo di un treno in una stazione sarà indicato con S' , mentre quello in partenza con S'' .
- L'uso del punto all'apice "•" indicherà che ci si riferisce ad una grandezza relativa al treno che precede in stazione il treno in esame; con il punto al pedice "•", ci si riferisce ad una grandezza relativa al treno in esame, ma nella stazione precedente. Per cui, ad esempio, p_{\bullet} è la partenza del treno in esame dalla stazione precedente, mentre p^{\bullet} è l'istante in cui è partito il treno prima di quello in esame (dalla stessa stazione).
- Il segno asterisco all'apice indica i passaggi di un treno secondo l'orario. Ad esempio, a^* indicherà l'ora d'arrivo prevista nell'orario nella stazione in esame.
- Nei diagrammi illustrativi spazio-tempo, le traiettorie effettive sono disegnate a tratto pieno mentre, quelle previste dall'orario, in tratteggio.

3. Criteri e regole

Un treno potrà accumulare ritardo sia in tratta che in stazione, per il calcolo del quale si pongono le seguenti regole operative:

1. a nessun treno che si trovi sulla propria traccia può essere addebitata, né una componente endogena come ritardo proprio, né una componente esogena come responsabilità nei confronti di un altro treno;
2. se un treno causa un ritardo ad un altro treno perché impossibilitato da un terzo treno a circolare come dovrebbe, trasferisce una parte o tutto il ritardo esogeno a quest'ultimo;
3. un treno deve diminuire il ritardo che eventualmente si trovasse ad avere all'inizio di una tratta e, se possibile, deve

annullarlo del tutto utilizzando l'allungamento a disposizione. Nel caso ciò non avvenga, si parlerà di *mancato recupero*;

TABELLA 1

SIMBOLOGIA

a	orario teorico di arrivo del treno di riferimento nella stazione in esame
\hat{a}	arrivo ottimale
f	istante di liberazione della linea
p	orario teorico di partenza del treno di riferimento dalla stazione in esame
D	distanziamento definito nella stazione corrente
E	componente esogena dello scostamento del treno
F	tempo libero nella stazione corrente
I	componente endogena dello scostamento del treno corrente
L	allungamento definito (da orario teorico) per il treno corrente
L^*	recupero possibile
L^{**}	recupero inutilizzato (mancato recupero)
S	scostamento in arrivo del treno di riferimento nella stazione corrente
ΔE	incremento dello scostamento esogeno nella stazione corrente
ΔI	incremento dello scostamento endogeno nella stazione corrente
ΔM	componente endogena del mancato recupero
ΔN	componente esogena del mancato recupero
ΔS	incremento dello scostamento del treno di riferimento nella stazione corrente
φ	coefficiente di attribuzione esogeno
ψ	coefficiente di attribuzione endogeno
Γ	matrice dei mancati recuperi
Θ	matrice delle variazioni dei ritardi in tratta
Ψ	matrice delle variazioni dei ritardi in stazione
D	matrice delle componenti esogene dei ritardi complessivi
H	matrice di ridistribuzione dei mancati recuperi
K	matrice delle componenti endogene dei ritardi complessivi
R	matrice dei ritardi complessivi

4. anche il mancato recupero potrà essere suddiviso in una componente endogena ed in una esogena, a seconda che il treno si accodi o non si accodi al treno che lo precede in linea. Infatti, nel caso che un treno, nel cercare di sfruttare il proprio allungamento, finisca per accodarsi ad un treno già in ritardo che lo precede in tratta, sarà quest'ultimo a dover essere considerato responsabile del mancato recupero del treno anzi detto;

5. i mancati recuperi non modificano, per definizione, i ritardi dei treni, ma si traducono in una redistribuzione delle responsabilità;

6. l'aumento di ritardo che viene indotto su di un altro treno non può superare il proprio ritardo complessivo;

7. il ritardo esogeno totale che un treno ha inflitto complessivamente agli altri treni è preso come misura del

⁽¹⁾RIACE è il sistema informatico di Rete Ferroviaria Italiana (Gruppo FS) che costituisce la base storica di circolazione dei treni e delle relative cause di ritardo.

disturbo provocato alla circolazione nel suo insieme e costituisce il peso da utilizzare nelle redistribuzioni di responsabilità;

8. si assumono valori di distanziamento minimi in ciascuna stazione, ad esempio secondo le normali specifiche delle progettazioni orario.

4. Interazioni elementari tra due treni

Le diverse dinamiche d'interazione che avvengono in tratta e in stazione richiedono una separata analisi dei due fenomeni.

4.1. Interazioni in stazione

Si considerino i passaggi dei treni ordinati in ogni singola stazione in base all'orario di partenza effettivo. Come detto, l'obiettivo di questa prima analisi è calcolare l'eventuale variazione del ritardo in stazione e suddividerla nelle due componenti endogena ed esogena.

Si definisce *tempo libero in partenza* F'' l'intervallo tra l'istante di liberazione del treno precedente e la partenza del treno di riferimento (esso corrisponde all'intervallo di tempo tra le due partenze p e p^* meno il distanziamento di partenza D''). Esso viene illustrato nella fig. 1, nella quale compare altresì l'analogo valore F' che verrà illustrato successivamente nel paragrafo dedicato alle interazioni in tratta.

Come si vede in figura, il tempo libero in partenza F'' è l'intervallo intercorrente tra l'istante in cui il treno sarebbe potuto partire rispettando la disciplina del distanziamento e l'istante in cui è effettivamente partito. Pertanto, esso rappresenta un eventuale aumento di ritardo attribuibile al treno, oppure il massimo tempo che in caso di necessità il treno avrebbe potuto recuperare, oppure ancora potrebbe essere una sosta fisiologica. Cosa rappresenti esattamente in relazione alla regolarità di marcia verrà stabilito in funzione di altri parametri, specificamente il ritardo in arrivo e l'istante di partenza previsto dall'orario.

Il tempo libero in partenza può essere calcolato tramite la seguente relazione:

$$F'' = p - p^* - D'' \quad (1)$$

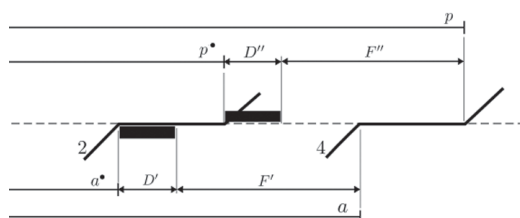


Fig. 1 - Tempo libero in arrivo e in partenza. Il treno 4, mantenendo il rispetto dei distanziamenti, sarebbe potuto arrivare all'interno dell'intervallo F' e sarebbe potuto partire all'interno dell'intervallo F'' .

Per definizione, la differenza tra gli scostamenti in partenza ed in arrivo fornirà la variazione di ritardo che il treno realizza in stazione:

$$\Delta S'' = S'' - S' \quad (2)$$

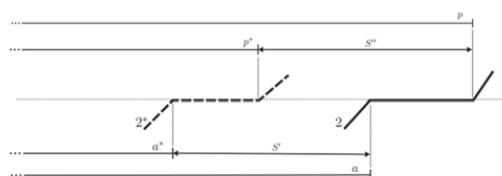


Fig. 2 - Scostamenti in arrivo e in partenza da una stazione (in tratteggio la traccia teorica).

Qualora si verifici un aumento di ritardo in stazione, il treno ne sarà responsabile al massimo nei limiti del tempo libero in partenza F'' . Pertanto, l'aliquota di incremento di ritardo endogeno, cioè attribuibile al treno, è rappresentato dal valore minimo tra il tempo libero in partenza e la variazione dello scostamento registrata in stazione: $\min(F'', \Delta S'')$. La differenza tra l'aumento di ritardo $\Delta S''$ e questo valore, il quale costituisce il massimo ritardo endogeno possibile, sarà considerato esogeno.

Prima però di assumere questo valore come aumento del ritardo esogeno, è necessario prendere in considerazione l'ulteriore ipotesi che il treno abbia dovuto concedere la precedenza ad un treno di categoria superiore *fuori traccia*⁽²⁾, evento rappresentato in fig. 3. Il treno 2, che viene trattenuto in stazione per concedere la precedenza al treno 4, subirà un aumento di ritardo esogeno. Ma è regola generale che nessuno possa generare un aumento esogeno superiore al proprio scostamento complessivo.

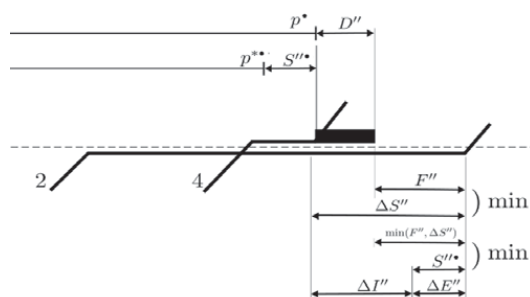


Fig. 3 - Variazioni di scostamento endogeno ed esogeno nel caso di precedenza ad un treno fuori traccia. Il treno 2 ha un incremento di ritardo pari a $\Delta S''$, ma una parte di questo incremento è dovuta alla precedenza da dare al treno 4; la parte esogena d'incremento non può essere superiore al ritardo del treno 4, per cui la parte rimanente è endogena.

⁽²⁾ In questo contesto, si definisce *fuori traccia*, un treno che, in seguito a ritardo, si trovi a circolare in coda ad almeno un treno che secondo l'orario teorico avrebbe dovuto precedere.

Per quanto precede, la variazione di scostamento esogeno viene calcolata nel modo seguente:

$$\Delta E'' = \min [\Delta S'' - \min(F'', \Delta S''), S''^*] \quad (3)$$

Da questa deriva la variazione endogena che, per definizione, è la differenza tra la variazione totale e la variazione esogena:

$$\Delta I'' = \Delta S'' - \Delta E'' \quad (4)$$

E' importante notare fin da adesso che, contestualmente al calcolo della variazione dello scostamento esogeno, viene individuato il treno responsabile dello stesso. L'identificazione del treno responsabile dello scostamento esogeno, però, deve essere considerata provvisoria in quanto, a sua volta, il treno responsabile sarebbe potuto essere stato obbligato da un altro o più treni, in diversi momenti del suo viaggio, a quel comportamento anomalo. Il problema viene affrontato e risolto in un successivo paragrafo dedicato alla propagazione delle interazioni.

4.2. Interazioni in tratta

Nel caso di analisi della circolazione in linea, oltre all'evenienza di aumento del ritardo ($\Delta S > 0$) o di recupero ($\Delta S < 0$), può verificarsi l'eventualità che un recupero, di per sé possibile, non venga poi realizzato. Come già detto, anche questa forma di irregolarità può essere di carattere endogeno o esogeno. Viene presentata separatamente l'analisi delle due tipologie di anomalia (variazione di ritardo e mancato recupero), per ricomporle successivamente.

4.2.1. Ritardi in tratta

Nella progettazione dell'orario, per ogni treno e in ogni tratta può essere definito l'allungamento L che rappresenta la massima riduzione possibile del tempo di percorrenza della tratta. Esso definisce implicitamente la massima velocità media per quel treno in quella tratta. Di conseguenza, l'allungamento rappresenta il massimo recupero possibile per un treno in ritardo, ossia il valore di recupero che il gestore dell'infrastruttura richiede o impone al treno ed alla relativa impresa di trasporto in tutti i casi possibili. Si noti come il recupero non possa che essere endogeno.

Il recupero è tuttavia possibile solo a condizione che, sulla linea non circoli immediatamente avanti ad esso un treno che renda impossibile percorrere la tratta alla massima velocità media senza infrangere il vincolo di distanziamento (che rimane comunque assicurato dal sistema di segnalamento).

Si definisce (cfr. fig. 1) *tempo libero in arrivo* F^i l'intervallo che intercorre tra l'arrivo di un treno in stazione e l'arrivo del treno seguente, decurtato del tempo di distanziamento D^i definito per quel treno e per quella tratta. Questo intervallo, se maggiore di 0, è a disposizione del treno che segue per poter diminuire il suo eventuale ritardo:

$$F^i = a - a^* - D^i \quad (5)$$

Siccome la variazione dello scostamento maturato da un treno in una tratta è costituita dalla differenza tra lo scostamento S^i , registrato in arrivo nell'impianto corrente, e lo scostamento S^j , registrato in partenza dall'impianto precedente, si può scrivere:

$$\Delta S^i = S^i - S^j \quad (6)$$

Come visto in precedenza, ΔS^i può assumere sia valori positivi (incremento di ritardo) che negativi (recupero); il suo valore algebrico è comunque limitato inferiormente dai valori con segno negativo dell'allungamento $-L$ e da quello del tempo libero in arrivo $-F^i$. Ai fini del calcolo, si consideri una variabile di servizio Q , che rappresenti l'eventuale aumento di ritardo:

$$Q = \max(\Delta S^i, 0) \quad (7)$$

E' possibile, quindi, determinare la componente esogena del ritardo:

$$\Delta E^i = \min[Q - \min(Q, F^i), S^{j*}] \quad (8)$$

La variazione dello scostamento endogeno è ricavabile, per definizione, come differenza tra la variazione di scostamento totale e la variazione dello scostamento esogeno:

$$\Delta I^i = \Delta S^i - \Delta E^i \quad (9)$$

Si evidenzia nuovamente come uno scostamento negativo (recupero) risulti sempre di natura endogena, mentre una variazione positiva dello scostamento (incremento del ritardo) possa essere composta da aliquote endogene ed esogene, anche contemporaneamente.

Infine, anche nel caso delle interazioni in tratta, viene individuato il treno responsabile in modo provvisorio, salvo rivalutazione successiva delle responsabilità.

4.2.2. Mancati recuperi

Si è già detto come la presenza dell'allungamento consenta ai treni che abbiano accumulato ritardo di potersi riallineare parzialmente o in modo completo all'orario. Dal momento che il recupero non potrà essere maggiore, né dell'allungamento L , né del ritardo in partenza dalla stazione precedente S^j , il *recupero possibile* L^* sarà:

$$L^* = \min(S^j, L) \quad (10)$$

Nel caso in cui un treno in ritardo utilizzi solo una parte del proprio allungamento senza annullare il ritardo stesso, è possibile definire il *recupero inutilizzato* L^{**} tramite l'equazione seguente (si assume che i treni non abbiano in modo esplicito l'anticipo di corsa il cui eventuale sfruttamento non dovrebbe comunque essere interpretato come causa di ritardo):

$$L^{**} = L^* + \min(\Delta S^i, 0) \quad (11)$$

In tal modo L^{**} risulta pari ad L^* se il treno in questione mantiene immutato od incrementa il suo ritardo, mentre risulta inferiore e pari a $L^* + \Delta S^i$ in caso di recupero (si tenga conto del segno negativo del recupero).

Anche i mancati recuperi possono essere suddivisi nella componente ΔM (*mancato recupero endogeno*), dipendente dal treno oggetto dell'analisi, e nella componente ΔN (*mancato recupero esogeno*) imposta al treno dalle condizioni di circolazione sulla linea. A tal fine si definiscono due grandezze ausiliarie: l'arrivo ottimale \hat{a} , che rappresenta l'arrivo del treno nell'impianto se il treno avesse sfruttato tutto il recupero possibile e l'istante di liberazione della linea f' che rappresenta l'istante a partire dal quale il treno può entrare in stazione (ipotizzando la disponibilità di un itinerario e la libertà di un idoneo binario di stazionamento o di transito):

$$\hat{a} = a - \Delta S' - L^* \quad (12)$$

$$f' = a^* + D' \quad (13)$$

L'utilizzo di queste grandezze consente di calcolare il mancato recupero endogeno ed esogeno di un treno nella tratta:

$$\Delta N = \min[\max(f' - \hat{a}, 0), \min(L^*, S^*)] \quad (14)$$

Esprimendo la (14) in funzione delle grandezze primarie definite in precedenza, si ottiene:

$$\Delta N = \min[\max(L^* + \Delta S' - F', 0), \min(L^*, S^*)] \quad (15)$$

Il mancato recupero endogeno è calcolato, per definizione, come differenza tra il recupero inutilizzato L^{**} ed il mancato recupero esogeno:

$$\Delta M = L^{**} - \Delta N \quad (16)$$

Come per le variazioni del ritardo, va rammentato che anche nel caso del calcolo del mancato recupero esogeno viene individuato il treno responsabile e che questa identificazione è provvisoria, sino alla fase conclusiva dell'analisi.

5. Propagazione delle interazioni in stazione e in tratta

Nei paragrafi precedenti sono state ricavate le formule per il calcolo delle variazioni degli scostamenti rispetto all'orario ed i mancati recuperi per tutti i treni, in tutte le tratte e tutte le stazioni, suddivisi nella componente endogena ed in quella esogena. La componente esogena è, fino a questo punto dell'analisi, attribuita totalmente al treno immediatamente precedente, il quale, però, potrebbe essere stato a sua volta condizionato da altri treni ed essere stato obbligato, almeno in parte, ad un comportamento anomalo. In tal caso sarebbe necessario redistribuirne una parte ad altri treni.

In questo paragrafo si mostra come sia possibile attribuire a ciascun treno la quota parte delle componenti esogene di cui si sia reso responsabile nei confronti di tutti gli altri treni, anche in forma mediata tramite il condizionamento di treni intermedi nella catena delle interazioni. Viene mostrata prima l'analisi relativa alla singola tratta e, successivamente, quella alla singola stazione.

5.1. Propagazione degli scostamenti in tratta

Siccome nel calcolo della redistribuzione dei ritardi esogeni ogni treno potrebbe, di principio, assegnare una quota parte del proprio ritardo endogeno a qualsiasi altro treno, la forma analitica naturale per descrivere il risultato di questa procedura sarà una matrice Θ di cui ogni elemento Θ_{ij} rappresenterà la quota parte di variazione del ritardo del treno i causata dal treno j . La matrice è quadrata e ad ogni treno corrisponde lo stesso indice sia di riga che di colonna (da un punto di vista sostanziale l'ordinamento degli indici non è rilevante, ma per semplificare la notazione, si suppongono indicizzati in modo naturale secondo la sequenza di passaggio). La somma della riga i della matrice rappresenterà la variazione di scostamento complessiva $\Delta S'$ del treno i e la somma della colonna j la variazione di ritardo complessiva causata dal treno j agli altri treni (ed a sé stesso). Sulla diagonale principale si troveranno i ritardi endogeni.

Per ogni treno i , si definiscono tramite la successiva (17) i coefficienti di attribuzione di ritardo in arrivo (*esogeno* ψ'_i ed *endogeno* φ'_i). Si rammenti che, per ogni treno, l'analisi della tratta può aver generato un solo valore di ritardo esogeno, relativo al treno successivo $i+1$ e, pertanto, è sufficiente utilizzare il solo indice i del treno.

$$\psi'_i = \frac{\Delta E'_i}{\Delta S'_i} \quad ; \quad \varphi'_i = \frac{\Delta I'_i}{\Delta S'_i} \quad (17)$$

Tramite questi coefficienti è possibile esprimere in altro modo la quota parte della variazione di scostamento esogeno causata dal treno i al treno che lo segue $i+1$:

$$\Delta E'_{i,i+1} = \Delta S'_{i+1} \cdot \psi'_{i+1} \cdot \varphi'_i \quad (18)$$

mentre, per il calcolo del ritardo che un generico treno i induce in un qualsiasi treno successivo k , si utilizza la formula generale:

$$\Delta E'_{ik} = \Delta S'_k \cdot \varphi'_i \cdot \prod_{h=i+1}^k \psi'_h \quad (19)$$

Si noti come nel caso in cui i due indici i e k della formula (19) siano identici, essa degradi nella equazione (20), dato che la produttoria perde significato:

$$\Delta E'_{ii} = \Delta S'_i \cdot \varphi'_i \quad (20)$$

e dunque, per $i=k$, si ottiene lo scostamento che un treno causa a se stesso ossia il proprio scostamento endogeno:

$$\Delta E'_{ii} = \Delta I'_i \quad (21)$$

Detto ciò, la matrice dei ritardi in tratta Θ è definita tramite la relazione (22):

$$\Theta = \{\Delta E'_{hk}\} \quad (22)$$

Si ripete che un valore della matrice con indici (h,k) rappresenta lo scostamento che il treno k induce nel treno h ed i termini sulla diagonale principale rappresentano i ritardi endogeni.

5.2. Propagazione dei mancati recuperi in tratta

In maniera analoga a quanto visto per la costruzione della matrice Θ , si mostra il procedimento per il calcolo della matrice Γ che descrive la propagazione dei mancati recuperi in tratta. Anche in questo caso si definiscono i coefficienti di attribuzione di mancato recupero (esogeno ψ_i ed endogeno φ_i):

$$\psi_i = \frac{\Delta M_i}{L_i^{**}} \quad ; \quad \varphi_i = \frac{\Delta N_i}{L_i^{**}} \quad (23)$$

Il calcolo del mancato recupero che un treno generico i genera in un qualsiasi treno successivo k si ottiene, in analogia a quanto visto in precedenza:

$$\Delta M_{ik} = L_k^{**} \cdot \varphi_i \cdot \prod_{h=i+1}^k \psi_h \quad (24)$$

Ancora una volta, nel caso in cui i due indici della formula (24) siano identici, essa degrada nella equazione (25), dato che la produttoria perde significato:

$$\Delta M_{ii} = L_i^{**} \cdot \varphi_i \quad (25)$$

Dunque, per $i=k$, si ottiene il proprio mancato recupero endogeno:

$$\Delta M_{ii} = \Delta N_i \quad (26)$$

Detto ciò, è possibile riassumere i risultati del processo di formalizzazione nella matrice dei mancati recuperi:

$$\Gamma = \{\Delta M_{hk}\} \quad (27)$$

5.3. Propagazione degli scostamenti in stazione

Al fine di calcolare la propagazione delle interazioni in stazione, si definiscono i coefficienti di attribuzione di ritardo in partenza (esogeno ψ''_i ed endogeno φ''_i):

$$\psi''_i = \frac{\Delta E''_i}{\Delta S''_i} \quad ; \quad \varphi''_i = \frac{\Delta I''_i}{\Delta S''_i} \quad (28)$$

Con la stessa metodologia vista nei due paragrafi precedenti, si perviene alla determinazione dell'incremento di scostamento in partenza da un impianto, causato dal treno i ad un qualsiasi treno successivo k :

$$\Delta E''_{ik} = \Delta S''_k \cdot \varphi''_i \cdot \prod_{h=i+1}^k \psi''_h \quad (29)$$

Anche in questo caso, per $i=k$ si ottiene l'incremento di ritardo endogeno in partenza del treno i :

$$\Delta E''_{ii} = \Delta I''_i \quad (30)$$

E' possibile riassumere i risultati di tutto il processo di formalizzazione nella matrice dei ritardi in stazione Ψ :

$$\Psi = \{\Delta E''_{hk}\} \quad (31)$$

Nel caso dell'analisi in stazione sarebbe inoltre possibile, per quanto accennato, anche l'analisi dei mancati recuperi per riduzione sulla sosta programmata, quando la stessa avesse compreso da orario un margine recuperabile, oltre l'intervallo di tempo standard previsto dal servizio nell'impianto. In questo studio non si prende per brevità in esame anche questo caso, sia perché del tutto riconducibile alla stessa metodologia finora esposta, sia perché il metodo, nell'ottica del Gestore Infrastruttura, non avrebbe in genere un diretto interesse a questa analisi ulteriore, essendo questo "margine" a disposizione dell'organizzazione interna dell'Impresa Ferroviaria.

6. Propagazione delle interazioni lungo una linea

Il processo illustrato finora consente di calcolare le tre matrici delle interferenze, due per ogni tratta (Θ , relativa ai ritardi, e Γ , relativa ai mancati recuperi), ed una per ogni stazione (Ψ , relativa ai ritardi). Per rendere completa l'analisi, sarà necessario definire un processo che integri le interferenze lungo la linea.

E' naturale assumere come unità d'analisi l'unione di una tratta con la stazione al termine della tratta stessa. Il processo d'integrazione si ripeterà per ogni coppia tratta-stazione secondo l'ordine di percorrenza. Per individuare tratte e stazioni s'introduce l'indice $n = 0, 1, 2, \dots$ (la stazione iniziale avrà indice $n=0$) e le matrici definite in precedenza verranno indicate con il medesimo indice n , come segue:

$$\Theta_n : \text{matrice delle variazioni dei ritardi in tratta} \quad (32)$$

$$\Gamma_n : \text{matrice dei mancati recuperi} \quad (33)$$

$$\Psi_n : \text{matrice delle variazioni dei ritardi in stazione} \quad (34)$$

Prima di effettuare la composizione si esegue una trasformazione su ogni singola matrice in modo da ottenere che ogni treno abbia lo stesso indice in tutte le matrici e che queste siano tutte della medesima dimensione $[f \cdot f]$ dove f è il numero complessivo di treni circolanti nello scenario. Non vi è alcuna alterazione dell'informazione: per i treni non circolanti in alcune tratte e stazioni si inseriranno valori nulli nelle celle di competenza.

Al termine di ogni tratta-stazione si produrrà una matrice R_n che darà conto del ritardo endogeno di ogni treno (sulla diagonale principale) e di quello esogeno suddiviso secondo le responsabilità degli altri treni in funzione dell'evoluzione della circolazione lungo l'intera linea fino a quel punto del tracciato.

Il processo di composizione è di tipo iterativo lungo la linea. Per ogni tratta-stazione n , si comporrà la matrice risultante dei ritardi relativi alle tratte precedenti R_{n-1} con le matrici degli scostamenti e la matrice dei mancati recuperi con indice n . Si calcola la matrice R_n tramite un'applicazione S che può essere scomposta in due applicazioni J e K , utilizzate alternativamente:

$$R_n = S(R_{n-1}, \Theta_n, \Gamma_n, \Psi_n) = J\{K[J(R_{n-1}, \Theta_n), \Gamma_n], \Psi_n\} \quad (35)$$

Il significato globale della (35) è relativamente semplice: la prima parte indica che una certa applicazione S consentirà il calcolo della matrice dei ritardi alla partenza dalla stazione n componendo la matrice dei ritardi alla partenza dalla stazione precedente con le variazioni degli scostamenti nella tratta, i mancati recuperi nella tratta e le variazioni degli scostamenti nella stazione. La seconda parte indica che la composizione avverrà in tre passi: innanzi tutto l'applicazione J comporrà la matrice dei ritardi alla partenza dalla stazione $n-1$ con la matrice dei ritardi in tratta; successivamente, il risultato verrà composto, tramite l'applicazione K , con la matrice dei mancati recuperi; ed infine, il risultato verrà composto, tramite la medesima applicazione J del primo passo, con la matrice della variazione degli scostamenti in stazione.

Per quanto riguarda la matrice iniziale R_0 , essa viene composta introducendo i ritardi in arrivo alla prima stazione sulla diagonale principale (cioè, considerandoli endogeni) e poi calcolando le interferenze nella stazione stessa. In modo più formale, si può considerare una stazione fittizia a monte ed una tratta fittizia in arrivo alla prima stazione e procedere con la composizione dei ritardi tramite l'applicazione S . S'inizializza il processo con due matrici nulle R_1 e Θ_0 , nonché con la Γ_0 , che rappresenta i ritardi sulla linea fittizia, ossia i ritardi in arrivo alla stazione iniziale (da considerare endogeni). Infine, combinandone il risultato con le interferenze nella prima stazione Ψ_0 si otterrà l' R_0 .

6.1. Composizione degli incrementi di scostamento in tratta (Applicazione J)

Si consideri la matrice dei ritardi complessivi R_{n-1} alla partenza dalla stazione $n-1$. Essa viene scomposta nella matrice relativa alla componente endogena dei ritardi K_{n-1} , ossia con i soli valori della diagonale principale e nulla nei rimanenti, ed in quella relativa alla componente endogena D_{n-1} , corrispondente alla matrice R_{n-1} con la diagonale principale azzerata:

$$R_{n-1} = D_{n-1} + K_{n-1} \quad (36)$$

Analogamente, per la matrice delle variazioni del ritardo Θ_n :

$$\Theta_n = E_n + I_n \quad (37)$$

La matrice I_n , o per dir meglio la sua diagonale principale, dà il risultato del comportamento lungo la tratta dei diversi treni per meriti o cause proprie. Valori negativi indicano un recupero, valori positivi un aumento di ritardo. I recuperi (che possono essere solo endogeni) devono essere sottratti direttamente ai ritardi endogeni K_{n-1} , a patto che ciascuno di essi non sia superiore al rispettivo ritardo endogeno (eventualità che può verificarsi per la presenza della componente esogena). La (38) seguente esprime l'eventuale recupero che può essere direttamente sottratto al ritardo endogeno:

$$L_n = \max(-K_{n-1}, I_n) \quad (38)$$

Una volta calcolata la matrice L_n , si può effettuare la prima correzione della matrice R_{n-1} , aggiungendo ad essa i ritardi (o i recuperi) endogeni ed ottenendo la matrice R'_n :

$$R'_n = R_{n-1} + L_n \quad (39)$$

Una volta fatta questa correzione, la matrice delle variazioni da considerare non sarà più la matrice Θ_n ma la matrice Θ'_n , ottenuta dalla prima sottraendole ciò che era stato aggiunto alla matrice dei ritardi:

$$\Theta'_n = \Theta_n - L_n \quad (40)$$

Si rammenti che la somma di ogni riga di questa matrice corrisponde alla variazione dello scostamento lungo la tratta fatta verificare dal treno (al netto dell'aggiustamento appena eseguito). In termini di valore complessivo, quindi, sommando R'_n e Θ'_n non si commetterebbero errori (così come sommando R_{n-1} e Θ_n). Ma in tal modo si assegnerebbero tutte le responsabilità endogene al treno che immediatamente ha interferito con la marcia, cioè quello a cui il treno si è accodato, senza tener conto della "storia" di quest'ultimo e dei possibili condizionamenti di cui esso potrebbe essere stato oggetto in precedenza. In conformità ai criteri enunciati, si distribuiranno le variazioni di ritardo esogeno agli altri treni in proporzione al ritardo endogeno con il quale, fino a quel momento, hanno aggravato la sua situazione, ossia secondo la matrice R'_n . Per poter eseguire i calcoli in modo corretto, la matrice dovrà essere opportunamente normalizzata in modo da trasformare i valori in coefficienti di ripartizione (a somma 1). Si calcola la somma di ogni riga s_i :

$$s_i = \sum_l D'_{n,il} \quad (41)$$

per cui si possono calcolare i coefficienti

$$\bar{R}'_{n,ij} = \frac{D'_{n,ij}}{s_i} \quad (42)$$

Si noti che, affinché l'equazione sia valida in tutti i casi, è necessario estendere il dominio di definizione del denominatore, comprendendo lo zero: in tal caso il valore della frazione sarà il valore stesso del numeratore; in particolare, l'espressione indefinita $0/0$, fornirà come risultato 0.

Tramite la matrice $\overline{\mathbf{R}}'_n$ è possibile attribuire la quota parte di ritardo esogeno al treno che l'ha generato, tenendo conto delle interazioni pregresse. Nell'equazione (43) è esplicitata l'applicazione \mathcal{J} relativa all'aggiornamento degli incrementi di ritardo in tratta:

$$\mathbf{J}_n = \mathcal{J}(\mathbf{R}_{n-1}, \Theta_n) = \mathbf{R}'_n + \Theta'_n \overline{\mathbf{R}}'_n \quad (43)$$

6.2. Composizione dei mancati recuperi (Applicazione \mathcal{L})

L'analisi precedente ha fornito la matrice \mathbf{J}_n che rappresenta i ritardi aggiornati con le variazioni degli scostamenti in tratta. Ma l'analisi della circolazione in tratta fornisce anche la matrice dei mancati recuperi Γ_n .

I mancati recuperi rappresentano eventi possibili che non si sono verificati. Di conseguenza, ad essi non corrispondono variazioni dei ritardi dei treni, ma determinano una redistribuzione delle responsabilità, nel senso che un treno gravato di un ritardo esogeno che non recuperi quanto sarebbe in grado di recuperare, dovrà assumerne su di sé la responsabilità, aumentando il ritardo endogeno e diminuendo della stessa quantità quello esogeno. Analogamente, e con segno opposto, se ad un treno viene impedito un recupero possibile (nei limiti dell'allungamento), sarà necessario diminuire il suo ritardo endogeno ed aumentare quello esogeno.

Il processo di redistribuzione dei ritardi verrà realizzato per mezzo di una matrice cubica $\mathbf{H}=[H_{ijk}]$. La presenza del terzo indice k e, dunque, l'impiego di una matrice a tre dimensioni, è necessario in quanto sono tre alla volta i treni coinvolti: si deve modificare la componente del ritardo del treno i dovuto al treno j in virtù del mancato recupero del treno k . Per semplicità notazionale, viene trascurato l'indice n relativo alla tratta-impianto, che non varia in questa trattazione.

La matrice $\mathbf{H}=[H_{ijk}]$ rappresenterà, appunto, la variazione della componente di ritardo del treno i causata dal treno j indotta dal mancato recupero del treno k .

Per costruire la matrice \mathbf{H} , si inizia ripetendo la matrice Γ lungo una nuova dimensione k ed ottenendo la matrice cubica $\mathbf{G}=[G_{ijk}]$ ove $G_{ijk}=\Gamma_{ij}$ per ogni i,j,k .

Si costruisce poi una seconda matrice cubica \mathbf{C} , di cui ogni elemento C_{ijk} è il coefficiente (il cui valore è compreso fra -1 ed 1) per il quale dovrà essere moltiplicato il corrispondente elemento di \mathbf{G} per ottenere H_{ijk} . Di conseguenza, si scrivono le seguenti espressioni

$$C_{ijk} = \begin{cases} 1 & \text{se } i = k \\ \frac{-J_{ij}}{\sum_l (J_{il}) - J_{ik}} & \text{se } i \neq k \end{cases} \quad (44)$$

$$H_{ijk} = G_{ijk} \cdot C_{ijk} = \Gamma_{ij} \cdot C_{ijk} \quad (45)$$

La variazione complessiva del ritardo esogeno del treno i dovuta al treno j , inflitta sia in modo diretto che tramite altri treni, è adesso calcolabile sommando tutti i termini al variare dell'indice k :

$$\overline{H}_{ij} = \sum_k H_{ijk} \quad (46)$$

Ed infine è possibile esplicitare l'applicazione \mathcal{L} :

$$\mathbf{K}_n = \mathcal{L}(\mathbf{J}_n, \Gamma_n) = \mathbf{J}_n + \overline{\mathbf{H}}_n \quad (47)$$

6.3. Composizione degli incrementi di scostamento in stazione (Applicazione \mathcal{J})

La composizione delle variazioni di scostamento in stazione si presenta identica alla composizione delle variazioni di scostamento in tratta e pertanto si utilizza la medesima applicazione \mathcal{L} . Per cui, ripetendo i passaggi espressi dalle (36) - (43) si può scrivere:

$$\mathbf{R}_n = \mathcal{J}(\mathbf{K}_n, \Psi_n) \quad (48)$$

7. Conclusioni

Si è presentato un metodo che, sulla base di pochi e ragionevoli principi e regole operative, consente di analizzare lo svolgimento della circolazione su di una linea ferroviaria in modo da quantificare la quota parte di ritardo di cui ogni treno è responsabile rispetto a qualsiasi altro circolante sulla medesima linea in qualsiasi scenario temporale (tipicamente le ventiquattr'ore).

Il processo si svolge in tre fasi:

1. separazione delle componenti endogene ed esogene per ogni tratta e per ogni stazione;
2. analisi delle interazioni tra tutti i treni che circolano in ogni singola tratta ed in ogni singola stazione;
3. ricomposizione dell'intera catena degli eventi per assegnare la quota parte di ritardo esogeno ai treni all'origine delle anomalie della circolazione.

Il metodo proposto è completo e consistente e riguarda l'analisi della circolazione così come appare dal confronto tra orario teorico ed il reale svolgimento della circolazione.

Sulla base dei risultati del modello sarà possibile effettuare valutazioni sofisticate della qualità della circolazione, sia da un punto di vista di un singolo treno, che da quello complessivo. Alcuni esempi di analisi potrebbero essere costituiti dalla formulazione di specifici indici di comportamento dei treni, quali, ad esempio, minuti · km

di ritardo endogeno ed esogeno o di mancato recupero; questi indici, o altri analoghi, potrebbero costituire un ragionevole giudizio sulla qualità del comportamento di un treno lungo la sua intera permanenza sulla rete.

Altro sviluppo importante del metodo può essere costituito da un'analisi statistica della circolazione in tutto il periodo di validità di un orario e non di una sola giornata. Si potrebbero, in tal modo, non solo individuare le ricorrenze delle anomalie di circolazione, ma anche individuare le tracce più a rischio e sulle quali intervenire prioritariamente rispetto ad altre.

Un ulteriore sviluppo potrebbe essere costituito dalla possibilità di analizzare un orario ancor prima della sua messa in esercizio, tramite opportune tecniche di simulazione probabilistiche sulla base dello stesso modello. In tal caso, in particolare, i dati "deterministici" presi a riferimento di una data istanza di circolazione, potrebbero essere sostituiti da distribuzioni di variabili casuali, aprendo la strada a nuovi metodi di ricerca e di sintesi del processo di controllo ferroviario.

Il metodo è stato implementato in APL (linguaggio di alto livello) ed è stato verificato in diversi casi di scenari ricavati dalla base dati RIACE; di questi, due vengono riportati nell'appendice F. Il metodo si presta pertanto ad essere ingegnerizzato ed integrato in "ambiente di produzione" nel sistema informativo del Gestore Infrastruttura, quale strumento di analisi routine dei dati, a supporto dell'organizzazione della Direzione Movimento a ciò dedicata.

7.1. Osservazione 1

Nella versione attuale, il metodo si applica alle linee a doppio binario con distanziamento a sezione di blocco automatico per il maggior interesse che queste rivestono nello scenario nazionale, pur potendosi estendere, con alcune integrazioni, anche a linee con altri tipi di distanziamento e a quelle a semplice binario. Trattasi quindi, al momento, di un modello che interessa solo un verso di circolazione, in cui si ipotizza, salvo informazioni integrative desumibili dalla registrazione dei dati in fase di gestione, che le perturbazioni di ritardo siano dovute al traffico di un solo verso di marcia.

7.2. Osservazione 2

Si deve osservare che un treno j accumula ritardo in partenza una volta consunto tutto lo scostamento di ritardo indotto dal treno i che precede e ad esso imputabile. Ciò potrebbe pertanto rappresentare un "abbuono" su j nel caso quest'ultimo, per propri motivi, avesse comunque bisogno di ritardare anch'esso la partenza a seguito di i . Trattasi, anche in tal caso, di una "regola del gioco" predefinita per tutti i soggetti coinvolti nello sce-

nario in mancanza di altre informazioni esterne o integrative nel caso reale di circolazione. Infatti, come detto in precedenza, il metodo fin qui esposto ricostruisce la storia delle perturbazioni sulla base dei soli "dati di marcia" e in assenza di altre "giustificazioni dei ritardi", come si avrebbe nella pratica anche nelle registrazioni dei sistemi di gestione della circolazione e che sono - come noto - riportate dal personale di Movimento (sono infatti le informazioni registrate, di norma in forma codificata, a cura dei Dirigenti Centrali DCO e Dirigenti Movimento della linea).

Nel passare alla fase di reale implementazione del metodo, si terrebbe conto - come è necessario fare - anche di dette informazioni, tramite le cosiddette "cause di ritardo" attribuite a singoli treni, imputando direttamente i relativi scostamenti da orario alle stesse cause che li hanno generati, e quindi classificando i ritardi e tracciandone la storia e i loro effetti indotti. In tal modo, nell'analisi finale delle perturbazioni, nulla cambierebbe rispetto ai risultati prodotti dall'algebra del presente metodo, ma i risultati dei ritardi dei treni si "colorerebbero" delle reali cause che li hanno generati, le quali in generale sono classificabili, al livello più alto, in cause imputabili a:

- infrastruttura (quindi assegnabili al Gestore della rete ferroviaria);
- trasporto (a carico dell'Impresa di Trasporto proprietaria del treno);
- eventi esterni (cioè imputabili a cause cosiddette "esterne alla ferrovia").

Si può in definitiva concludere che:

- il metodo proposto, di esclusivo carattere algebrico-cinematico, opportunamente integrato con eventuali registrazioni di Movimento, può rappresentare quel reale strumento di controllo qualità della circolazione da sempre atteso, introducendo una maggiore efficienza e razionalità nei modi tradizionali di procedere;
- si potrebbe evitare di richiedere agli operatori di Movimento già citati (DM, DC, DCO) di imputare le cause indotte o indirette di circolazione, che il più delle volte sono di non facile ricostruzione o risultano attribuite molto soggettivamente. Gli stessi operatori potrebbero essere così sgravati da un compito spesso improbo e concentrarsi sull'attività di regolazione della circolazione, ovvero solo sulle cause "prime" di ritardo e sui casi eccezionali;
- gli stessi risultati possono inoltre servire a fornire una base razionale e "analitica" alla imputazione e distribuzione dei pesi di ritardo quali input del "performance regime";
- in conclusione, grazie anche all'integrazione con i moderni sistemi informativi, si può pervenire ad un nuovo processo di controllo qualità oltre che di analisi tecnico-economica della circolazione ferroviaria.

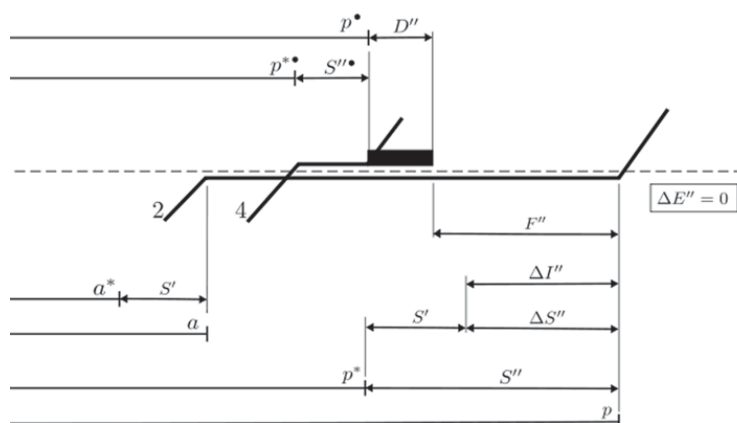


Fig. 4 - Ritardo endogeno in stazione. Il treno 2 giunge con un ritardo S' e deve lasciare la precedenza al treno 4; siccome non riparte, come potrebbe, al momento della liberazione accumula un ulteriore ritardo $\Delta S'' = S'' - S'$, da considerare endogeno.

APPENDICE A

Esempi d'interazione tra treni in stazione

A.1. Ritardo endogeno in stazione

Nel caso mostrato in fig. 4, il treno 2, che lascia la precedenza al treno 4, potrebbe partire al termine del distanziamento D'' , ma ciò non accade. Rifacendosi alle relazioni stabilite nel testo, le stesse conclusioni si ottengono osservando che la variazione di ritardo $\Delta S''$ risulta maggiore di F'' e dunque il treno che precede non influenza il comportamento di quello che segue. In questo caso l'incremento di ritardo maturato dal treno 2 è di tipo interamente endogeno e pari a $\Delta S''$.

A.2. Ritardo esogeno in stazione

Nel caso proposto in fig. 5, il treno 2, che lascia la precedenza al 4, sarebbe potuto partire rispettando l'orario all'istante p^* , ma ha dovuto attendere la partenza dell'altro treno ed è partito appena possibile, ossia alla fine del distanziamento in partenza. Secondo le re-

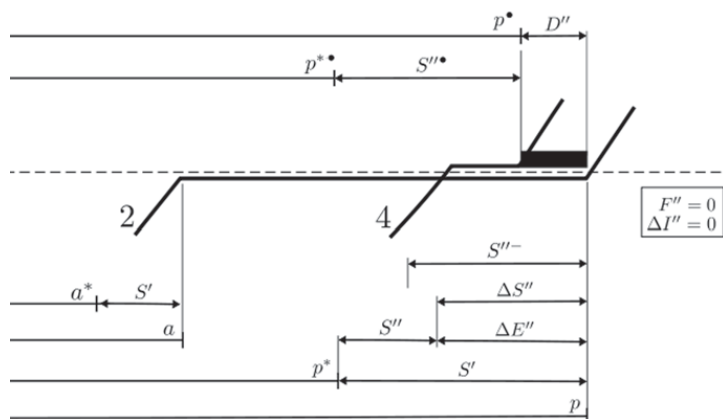


Fig. 5 - Ritardo esogeno in stazione. Il treno 2 è costretto a concedere la precedenza al treno 4 in ritardo, per cui non può rispettare l'orario: l'incremento di ritardo $\Delta S''$ è da considerare esogeno.

lazioni stabilite: $\Delta S''$ è maggiore del tempo libero in partenza F'' che è nullo, per cui il ritardo esogeno è pari a $\Delta S''$ ed il ritardo endogeno è nullo.

A.3. Ritardo endogeno ed esogeno in stazione

In quest'ultimo caso, proposto in fig. 6, sono presenti ambedue i tipi di ritardo, endogeno ed esogeno. Il treno 2 condiziona la partenza treno 4 in ritardo il quale, invece di partire non appena possibile, prolunga la sua sosta. In questo caso, la componente esogena del ritardo $\Delta E''$ è ricavabile tramite la (3) e, di conseguenza, si può ricavare il ritardo endogeno $\Delta I''$ mediante la relazione sempre valida $\Delta I'' = \Delta S'' - \Delta E''$.

APPENDICE B

Esempio di ritardo in tratta

Nell'esempio mostrato in fig. 7 si vede come il treno 4 maturi un ritardo esogeno ed uno endogeno. In analogia a quanto visto per il caso in stazione il valore del ritardo

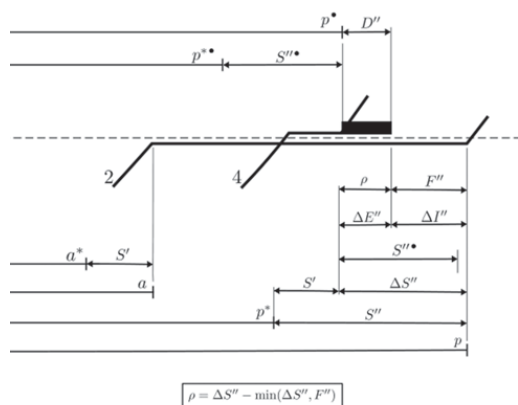


Fig. 6 - Ritardo endogeno ed esogeno in stazione. Il treno 2, giunto con ritardo S' potrebbe partire in orario al tempo p^* , ma deve concedere la precedenza al treno 4 che così gli infligge un incremento di ritardo esogeno; il treno 2, però, non riparte al momento della liberazione della linea, per cui accumula anche un incremento di ritardo endogeno.

endogeno coincide con il tempo libero in arrivo F' poiché quest'ultimo risulta minore del ritardo in arrivo del treno precedente. Si rammenti in questo caso la regola generale per cui un treno non può causare un incremento del ritardo superiore al proprio scostamento.

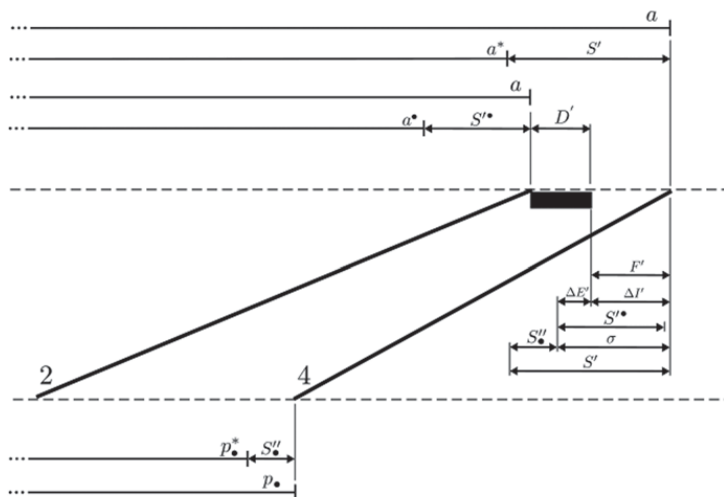


Fig. 7 - Ritardo endogeno ed esogeno in tratta. Il treno 4 parte dalla stazione precedente con un ritardo S''^* e l'allungamento disponibile gli consentirebbe di recuperare il ritardo se non ci fosse il treno 2: questo ritardo residuo $\Delta E'$, irrecoverabile a causa del treno 2, è da considerare esogeno; siccome, però, il treno 2 giunge dopo un tempo F' dalla liberazione, questo ulteriore ritardo $\Delta I'=F'$ è di natura endogena.

Esempi di mancato recupero

C.1. Mancato recupero endogeno

Nell'esempio mostrato in fig. 8 il treno 2 non può influenzare il comportamento del treno 4 e pertanto ritardi e recuperi di questo sono interamente imputabili al treno stesso.

Il treno 4 parte dalla stazione precedente con un ritardo pari a S''^* ed a seconda della velocità tenuta si possono verificare diverse situazioni. Alla velocità di massimo recupero, il treno è in condizione di recuperare tutto il ritardo, per cui avremmo un recupero dello stesso valore (variazione negativa) del ritardo iniziale.

Alla velocità d'orario, il ritardo S' con cui arriverebbe sarebbe il medesimo S''^* per cui non si avrebbe né aumento di ritardo, né recupero, ma si dovrebbe parlare di mancato recupero, sempre dello stesso valore numerico del ritardo iniziale.

Ipotizzando una velocità ancora inferiore, come ipotizzata nell'esempio, oltre al mancato recupero dello stesso valore numerico di prima, bisognerà mettere in conto un aumento di ritardo $\Delta S'$.

Naturalmente, si potrà realizzare qualsiasi situazione intermedia.

C.2. Recupero, mancato recupero endogeno e mancato recupero esogeno

La fig. 9 rappresenta il caso in cui il treno 4 in ritardo realizza un recupero parziale. Esso, infatti, tiene una velocità superiore a quella d'orario, per cui il ritardo all'arrivo sarà inferiore di quello alla partenza dalla stazione precedente. Ma il treno non ha sfruttato interamente l'allungamento a disposizione, cosa che d'altronde non avrebbe potuto neanche fare completamente in quanto si sarebbe trovato a doversi accodare al treno 2. In questa situazione si dovrà riconoscere al treno il recupero $\Delta I'=S''^*-S'$, un mancato recupero endogeno ΔM corrispondente al tempo che avrebbe ancora potuto recuperare fino ad accodarsi al treno 2 ed un mancato recupero esogeno ΔN che corrisponde a quanto ancora avrebbe potuto recuperare nei limiti dell'allungamento a disposizione se non fosse stato presente l'ostacolo del treno 2.

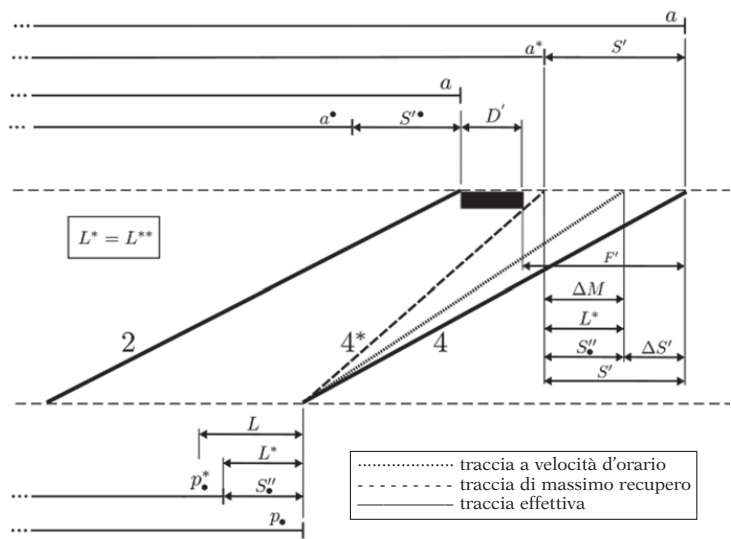


Fig. 8 - Mancato recupero endogeno. Il treno 4 parte dalla stazione precedente con un ritardo pari a S''_a e tiene una velocità inferiore a quella d'orario per cui oltre ad essere responsabile di un mancato recupero, gli verrà attribuito un aumento di ritardo endogeno.

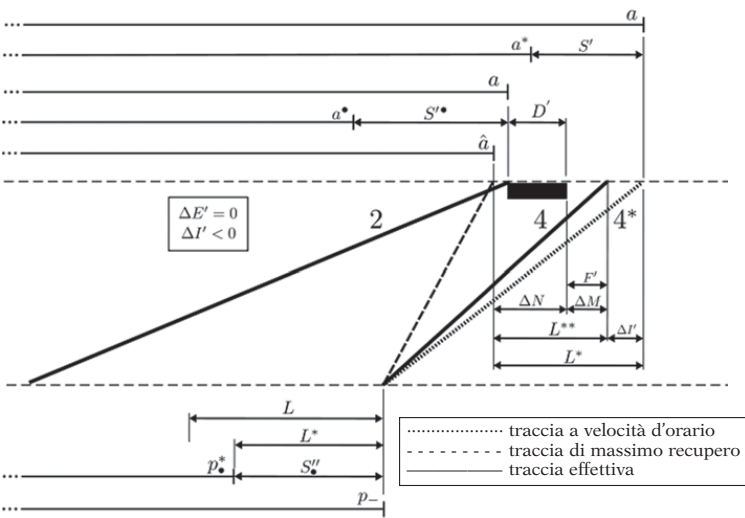


Fig. 9 - Recupero, mancato recupero endogeno e mancato recupero esogeno. Il treno 4 recupera una parte del ritardo, ma non quanto avrebbe potuto nei limiti dell'allungamento: in parte per propria responsabilità perché avrebbe potuto tenere una velocità maggiore fino ad accordarsi al treno 2 ed in parte per responsabilità di questo, che comunque gli avrebbe impedito di tenere la velocità di massimo recupero.

APPENDICE D

Esempi di propagazione dei ritardi

Negli esempi che seguono, relativi ai diversi casi di propagazione dei ritardi, si è costretti ad abbandonare la convenzione ferroviaria di numerare le tracce ascendenti con una numerazione pari per ripristinare la numerazione naturale di passaggio allo scopo di essere coerenti con la trattazione teorica.

D.1. Propagazione fra più treni in stazione

Nell'esempio presentato in fig. 10 è riportato l'andamento teorico (linee tratteggiate) di cinque treni in una stazione e la circolazione come realmente avvenuta. Il calcolo della propagazione dei ritardi si sviluppa a partire dalle variazioni di ritardo maturate da ogni treno in partenza dall'impianto e dalle relative aliquote endogene ed esogene. I valori di queste quantità sono riportate nella tabella 2.

Il calcolo della matrice della propagazione dei ritardi Ψ viene esplicitato per ciascun elemento (gli elementi della matrice con il secondo indice maggiore del primo, ossia quelli al di sopra della diagonale principale, sono obbligatoriamente nulli perché i treni sono ordinati secondo l'ordine di partenza ed un treno non può condizionare in stazione un treno partito prima di esso).

TABELLA 2
SCOSTAMENTI E COMPONENTI ENDOGENE ED ESOGENE DELLA FIG.10

Treni	$\Delta E'$	$\Delta I'$	$\Delta S'$	ψ	φ
1	0.00.00	0.04.00	0.04.00	0,00	1,00
2	0.07.30	0.04.00	0.11.30	0,65	0,35
3	0.00.00	0.16.30	0.16.30	0,00	1,00
4	0.06.00	0.04.30	0.10.30	0,57	0,43
5	0.03.00	0.00.00	0.03.00	1,00	0,00

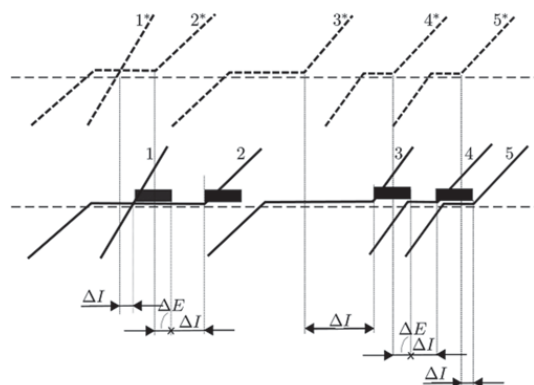


Fig. 10 - Composizione dei ritardi in partenza di più treni da una stazione. In alto l'orario teorico, in basso l'orario reale.

$$\Delta E''_{11} = \Delta S''_1 \cdot \varphi''_1 = 04.00 \cdot 1,0 = 04.00 \quad (49)$$

$$\Delta E''_{12} = \Delta S''_2 \cdot \varphi''_1 \cdot \prod_{h=2}^2 \psi''_h = 11.30 \cdot 1,0 \cdot 0,65 = 7.30 \quad (50)$$

$$\Delta E''_{13} = \Delta S''_3 \cdot \varphi''_1 \cdot \prod_{h=1}^2 \psi''_h = 11.30 \cdot 1,0 \cdot 0,65 \cdot 0 = 00.00 \quad (51)$$

$$\vdots \quad (52)$$

$$\Delta E''_{22} = \Delta S''_2 \cdot \varphi''_2 = 11.30 \cdot 0,35 = 04.00 \quad (53)$$

$$\vdots \quad (54)$$

$$\Delta E''_{33} = \Delta S''_3 \cdot \varphi''_3 = 16.30 \cdot 1,0 = 16.30 \quad (55)$$

$$\Delta E''_{34} = \Delta S''_4 \cdot \varphi''_3 \cdot \prod_{h=4}^4 \psi''_h = 10.30 \cdot 1,0 \cdot 0,57 = 6.00 \quad (56)$$

$$\Delta E''_{35} = \Delta S''_5 \cdot \varphi''_3 \cdot \prod_{h=4}^5 \psi''_h = 03.00 \cdot 1,0 \cdot 0,57 \cdot 1,0 = 01.43 \quad (57)$$

$$\Delta E''_{44} = \Delta S''_4 \cdot \varphi''_4 = 10.30 \cdot 0,43 = 04.30 \quad (58)$$

$$\Delta E''_{45} = \Delta S''_5 \cdot \varphi''_4 \cdot \prod_{h=5}^5 \psi''_h = 03.00 \cdot 0,43 \cdot 1,0 = 01.17 \quad (59)$$

$$\Delta E''_{55} = \Delta S''_5 \cdot \varphi''_5 = 03.00 \cdot 0 = 00.00 \quad (60)$$

Si ottiene così la matrice delle interferenze relativa alla stazione per i treni in partenza:

$$\Psi = \begin{bmatrix} 0.04.00 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.07.30 & 0.04.00 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.16.30 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.06.00 & 0.04.30 & 0 \\ 0 & 0 & 0.01.43 & 0.01.17 & 0.00.00 \end{bmatrix} \quad (61)$$

Come si vede, l'interazione tra i treni dello scenario è compiutamente rappresentata dalla matrice (61). Ad esempio il treno 3 parte dall'impianto accumulando 16' 30" di ritardo endogeno (Ψ_{33}) ed infliggendo al treno seguente, il 4, 6' di ritardo (Ψ_{34}) ed al treno 5 1' 43" (Ψ_{35}).

D.2. Esempio di doppia precedenza in stazione

Nell'esempio riportato in figura 11 si espone l'applicazione del metodo di calcolo e di attribuzione degli spostamenti nel caso si una doppia precedenza (tabella 3).

Applicando il metodo come esposto nell'esempio precedente, si ottiene la seguente matrice delle interferenze:

$$\Psi = \begin{bmatrix} 17 & 0 & 0 \\ 17 & 26 & 0 \\ 13.05 & 19.95 & 12 \end{bmatrix} \quad (62)$$

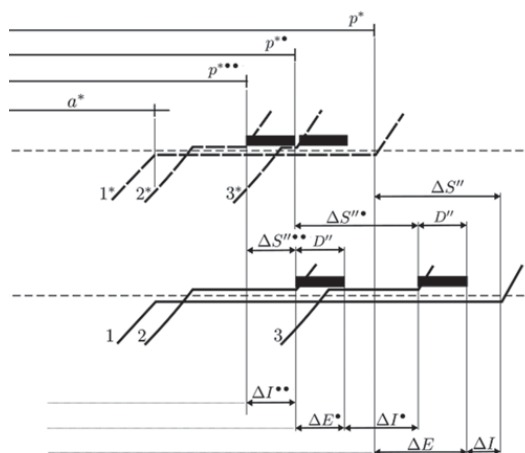


Fig. 11 - Composizione dei ritardi in partenza con doppia precedenza da una stazione. In alto l'orario teorico, in basso l'orario reale.

TABELLA 3
SCOSTAMENTI E COMPONENTI ENDOGENE ED ESOGENE DELLA FIG.11

Treno	$\Delta E''$	$\Delta I''$	$\Delta S''$	ψ	ϕ
1	17	17	0	0	1
2	43	26	17	0,4	0,6
3	45	12	33	0,73	0,27

APPENDICE E

Esempio completo

Come esempio completo di applicazione del metodo, si presenta un caso ad hoc, semplice ma non banale, in cui circolano 5 treni in una linea con tre stazioni. In fig. 12 si

mostra l'orario grafico e nella tabella 4 si riportano i valori dei passaggi previsti dall'orario (a^* , p^*), quelli effettivi (a , p) ed i ritardi in arrivo e in partenza (S' , S'').

E.1. Calcolo delle interazioni elementari

Il primo passo del processo consiste nello studio delle interazioni elementari tra i treni, ossia inizia con la suddivisione degli incrementi di ritardo di ogni treno in ogni tratta nella componente endogena ed esogena, nonché con il calcolo e l'analoga suddivisione dei mancati recuperi. Il risultato è riportato nella tabella 5.

E.2. Propagazione delle interazioni in stazione ed in tratta

Successivamente al calcolo delle interazioni elementari, si calcola la propagazione delle interazioni in ogni singola stazione e in ogni singola tratta.

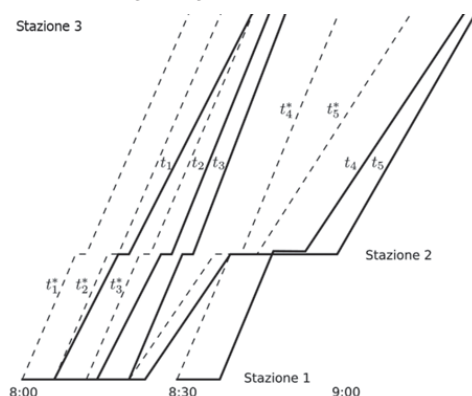


Fig. 12 - Orario grafico (in tratteggio le tracce programmate, in linea continua la reale circolazione).

TABELLA 4
ORARIO PROGRAMMATO ED EFFETTUATO NELLO SCENARIO DI FIG.12

Treno	Stazione	a^*	a	S'	p^*	p	S''
1	Stazione 1	08.00.00	08.00.00	0	08.00.00	08.06.00	6
1	Stazione 2	08.10.00	08.18.00	8	08.12.00	08.20.00	8
1	Stazione 3	08.32.00	08.44.00	12	08.32.00	08.44.00	12
2	Stazione 1	08.06.00	08.06.00	0	08.06.00	08.14.00	8
2	Stazione 2	08.16.00	08.26.00	10	08.18.00	08.28.00	10
2	Stazione 3	08.38.00	08.47.00	9	08.38.00	08.47.00	9
3	Stazione 1	08.12.00	08.12.00	0	08.12.00	08.20.00	8
3	Stazione 2	08.22.00	08.30.00	8	08.24.00	08.32.00	8
3	Stazione 3	08.44.00	08.50.00	6	08.44.00	08.50.00	6
4	Stazione 1	08.20.00	08.20.00	0	08.20.00	08.23.00	3
4	Stazione 2	08.36.00	08.39.00	3	08.44.00	08.59.00	15
4	Stazione 3	09.14.00	09.26.00	12	09.14.00	09.26.00	12
5	Stazione 1	08.29.00	08.29.00	0	08.29.00	08.37.00	8
5	Stazione 2	08.39.00	08.47.00	8	08.41.00	08.53.00	12
5	Stazione 3	09.00.00	09.24.00	24	09.00.00	09.24.00	24

TABELLA 5
COMPONENTI ENDOGENE ED ESOGENE DEI RITARDI (MIN)

Treno	Stazione	$\Delta I''$	$\Delta E''$	$\Delta I'$	$\Delta E'$	ΔM	ΔN
1	Stazione 1	6	0	0	0	0	0
2	Stazione 1	6	2	0	0	0	0
3	Stazione 1	4	4	0	0	0	0
4	Stazione 1	1	2	0	0	0	0
5	Stazione 1	8	0	0	0	0	0
1	Stazione 2	0	0	2	0	4	0
2	Stazione 2	0	0	2	0	4	0
3	Stazione 2	0	0	0	0	2	2
4	Stazione 2	4	8	0	0	3	0
5	Stazione 2	4	0	0	0	4	0
1	Stazione 3	0	0	4	0	4	0
2	Stazione 3	0	0	-1	0	1	2
3	Stazione 3	0	0	-2	0	1	1
4	Stazione 3	0	0	12	0	4	0
5	Stazione 3	0	0	-3	0	0	1

Come mostrato nel paragrafo 5, il risultato del processo si concretizza nel calcolo delle matrici, Θ_n , Γ_n e Ψ_n , le prime due relative alle tratte e l'ultima alle stazioni.

Per intendere l'uso degli indici delle matrici, si rammenti che l'unità logica d'analisi si è stabilito essere l'insieme tratta-stazione e che alla prima stazione si è attribuito l'indice 0. Inoltre, si è formalmente inserita una stazione ed una tratta fittizia a monte della prima stazione. Di conseguenza, l'indice della stazione fittizia sarà -1, quello della tratta fittizia e della prima stazione reale sarà 0, e così via. Ciò comporterà un disallineamento tra denominazione delle stazioni (1,2 e 3) e indice delle matrici (0,1 e 2).

I treni si sono fatti partire in orario dalla stazione 1, per cui le matrici Θ_0 e Γ_0 saranno nulle e non vengono riportate. Il calcolo inizia dalla matrice Ψ_0 delle interferenze nella stazione 1 (con indice 0).

E.2.1. Stazione 1

$$\Psi_0 = \begin{bmatrix} 6 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 6 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 3 & 4 & 0 & 0 \\ 0,25 & 0,75 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 8 \end{bmatrix} \quad (63)$$

E.2.2. Tratta 1 e stazione 2

$$\Theta_1 = \begin{bmatrix} 2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (64)$$

$$\Gamma_1 = \begin{bmatrix} 4 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 4 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 4 \end{bmatrix} \quad (65)$$

$$\Psi_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 4 & 8 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 4 \end{bmatrix} \quad (66)$$

E.2.3. Tratta 2 e stazione 3

$$\Theta_2 = \begin{bmatrix} 4 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 12 \end{bmatrix} \quad (67)$$

$$\Gamma_2 = \begin{bmatrix} 4 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0,67 & 0,33 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 4 \end{bmatrix} \quad (68)$$

$$\Psi_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (69)$$

E.3. Composizione delle interazioni

Infine, si esegue la composizione delle interazioni nelle tratte e nelle stazioni, lungo l'intera linea, tramite la (35).

Anche in questo caso, non viene riportata la matrice iniziale R_{*1} , relativa alla partenza dalla stazione fittizia all'inizio della linea, perché sempre nulla:

$$R_0 = \begin{bmatrix} 6 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 6 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 3 & 4 & 0 & 0 \\ 0,25 & 0,75 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 8 \end{bmatrix} \quad (70)$$

$$R_1 = \begin{bmatrix} 8 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 10 & 0 & 0 & 0 \\ 0,1 & 3,5 & 4,4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 7 & 8 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 12 \end{bmatrix} \quad (71)$$

$$R_2 = \begin{bmatrix} 12 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 7 & 0 & 0 & 0 \\ 0,73 & 2,47 & 2,81 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 3 & 9 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 24 \end{bmatrix} \quad (72)$$

E.4. Osservazioni

Tramite l'analisi delle matrici R_n , è possibile valutare in modo esaustivo il comportamento dei treni lungo la linea. In particolare, sulla base della matrice R_2 , si possono fare le seguenti osservazioni relative alla situazione al termine della linea:

- si vede che il treno 1 è in ritardo di 12' (somma della riga 1) e, scorrendo la colonna 1, si vede che ha causato un ritardo di 2' al treno 2 ed un ritardo di 0,73' al treno 3;
- analizzando la riga 2, si vede che il treno 2, oltre ad essere condizionato dal treno 1, accumula un ulteriore ritardo di 7' imputabili ad esso stesso (valore sulla diagonale principale);
- scorrendo la riga 3, si vede che il treno 3 è stato condizionato anche dal treno 2 che gli ha imposto un aumento di ritardo di 2,47' e che, oltre ai ritardi causati dai treni 1 e 2, accumula un ulteriore ritardo endogeno di 2,81';
- il treno 4 accumula 12' di ritardo globale (somma della riga) di cui 9' causati dal treno 5 (ritardo sulla precedenza) e 3' di tipo endogeno;
- il treno 5 giunge con un ritardo endogeno di 24'.

Analoghe considerazioni potrebbero essere svolte analizzando la matrice R_1 , relativa alla seconda stazione.

APPENDICE F

Caso reale

E' stato sviluppato un software per il calcolo completo del modello proposto in questo lavoro. Esso calcola tutti i valori illustrati nei paragrafi precedenti, ma siccome la forma matriciale dei risultati non è di facile lettura, soprattutto quando circolano alcune centinaia di treni, si è sviluppato un modulo di post elaborazione in grado di creare un report sul comportamento di ogni singolo treno. Si presenta un esempio d'applicazione del modello ad un caso reale tratto da RIACE e riguardante la circolazione dei treni pari sulla linea Pescara-Bari il 1° marzo 2007. I treni circolanti nelle ventiquattro ore erano 230 e di essi si riporta il report relativo al treno 9418.

TABELLA 6

LINEA PESCARA-BARI, 1° MARZO 2007, TRENO 9418

Loc.	<i>a</i>	<i>S'</i>	<i>p</i>	<i>S''</i>	<i>I</i>	<i>E''</i>	78020	58530	56350	12034
11119 BARI C.LE	15.00.30		15.10.30	2.30	2.30					
					3.00					
11148 BARI PARCO NORD	15.15.00	3.00	15.15.00	3.00	3.00					
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮					
11103 Cerignola	15.54.00	3.00	15.54.00	3.00	3.00					
					3.30					
11102 Ortanova	16.00.30	3.30	16.01.00	4.00	4.00					
					4.00					
11101 Incoronata	16.06.00	4.00	16.06.30	4.30	4.30					
					4.30					
11100 FOGGIA	16.13.30	4.30	16.17.00	5.00	5.00					
					5.30					
11028 Rignano Gargan.	16.24.30	5.30	16.24.30	5.30	5.30					
					4.00					
11025 SAN SEVERO	16.30.00	4.00	16.31.30	5.30	5.30					
					6.30					
11024 Apricena	16.37.30	6.30	16.37.30	6.30	6.30	6.30	6.30			
					6.30	3.01	2.30			
11023 Poggio Imperiale	16.40.30	6.30	16.40.30	6.30	6.30	3.01	2.30			
					4.00	1.30	1.30			
11030 PM Lesina	16.43.00	4.00	16.43.00	4.00	4.00	1.30	1.30			
					3.30					
11022 PM Ripalta	16.45.30	3.30	16.45.30	3.30	3.30					
					2.30					
11021 Chieuti Serrac.	16.49.30	2.30	16.49.30	2.30	2.30					
					0.30					
11020 Campomarino	16.54.30	0.30	16.54.30	0.30	0.30					
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮					
7507 Porto S.Elpidio	18.35.30	0.30	18.36.00	0.30	0.30					
7506 CIVITANOVA	18.41.30	0.30	18.42.30	1.30	1.30					
					1.30					
7505 Potenza Pic.	18.46.30	1.30	18.46.30	1.30	1.30					
					1.00					
7504 Porto Rec.	18.50.30	1.30	18.50.30	1.30	1.00	1.00				1.00
					0.30	0.30				0.30
7503 Loreto	18.52.30	0.30	18.53.00	1.00	1.00	0.42			0.12	0.30
						0.04			0.04	
7502 Osimo Castelf.	18.56.00		18.56.30	0.30	0.30	0.04			0.04	
7500 Varano	19.01.30		19.11.00	9.00	9.00	9.00				
7113 ANCONA	19.19.00	9.00	19.33.00	20.00	20.00					

Nelle tabelle, le prime cinque colonne, oltre ai nomi delle stazioni, riportano i dati fondamentali della circolazione: arrivi, partenze e ritardi (a, p, S' ed S''); le due colonne successive i ritardi endogeni I ed esogeni (provocati) E . Si tenga conto che in questi rapporti il valore riportato come ritardo esogeno va inteso come ritardo provocato agli altri treni e non come quello subito. Seguono quindi tante colonne quanti sono i treni danneggiati dal treno in esame (per cui la somma di riga di quest'ultime colonne sarà pari ad E). Le righe delle tabelle si riferiscono alternativamente alle stazioni ed alle tratte, in particolare, le righe senza l'indicazione della stazione fanno riferimento alle tratte.

Treno 9418

La tabella 6 presenta il report relativo al treno 9418, il quale parte dalla stazione di Bari Centrale con 2' e 30" di ritardo, senza aver inflitto ritardi ad altri treni. Il treno accumula progressivamente un ritardo fino a giungere ad Apricena con 6' e 30" di ritardo.

In questa stazione infligge un ritardo, anch'esso di 6' e 30", al treno 78020. Tra Apricena e PM Ripalta il treno danneggiato riesce a recuperare completamente il ritardo. Nelle stazioni successive, fino a Porto Recanati, il treno mantiene ritardi compresi tra i 4' ed i 30".

Tra le stazioni di Porto Recanati ed Osimo Castel Fido la propagazione dei ritardi coinvolge due treni.

Sommaire	Summary	Zusammenfassung
NOUVELLE METHODE D'ANALYSE DES RETARDS ET EVALUATION DU "PERFORMANCE REGIME"	A NEW METHOD FOR DELAY ANALYSIS AND "PERFORMANCE REGIME" EVALUATION	NEUES ANALYSVERFAHREN DER VERSPÄTUNGEN UND BEWERTUNG DES "PERFORMANCE REGIME"
<p>Parmi les thèmes au centre de l'attention dans le contexte ferroviaire, le contrôle de l'allure des trains et la mesure économique relative (Performance Regime) gagnent de plus en plus d'importance pour les importantes implications économiques et de gestion qui en dérivent. Dans cet étude on présente une méthode formelle d'analyse de la circulation qui permet l'attribution des causes et la correcte quantification des responsabilités des retards le long de toute la chaîne des événements. On peut ainsi obtenir la correcte évaluation du service et pour les opportunités valorisations économiques dans le contexte du "Performance Regime".</p>	<p>The train running control and the relevant economical quantification ("performance regime") are some of the questions that are more and more gaining importance in the railway field because of the relevant management and economical implications. This paper illustrates a formal method for railway running analysis; it allows the cause allocation and the correct quantification of the train delay responsibilities along the whole event chain. A suitable quantitative base can then be achieved for service evaluation and for a proper economical estimation in the context of the performance regime.</p>	<p>Die Kontrolle des Vorgang der Lauf der Züge und seines ökonomischen Äquivalents (Performance Regime) wird immer wichtiger unter dem Sichtpunkt der betrieblichen und ökonomischen Folgerungen.</p> <p>Hier wird eine Methode die die Verspätungs Ursachen und Verantwortlichkeiten, entlang die ganze Ereignissenkette, erkennt.</p> <p>Das erlaubt eine richtige Gründung für die Betriebsbewertung und ihre ökonomischen Konsequenzen im Rahmen des Verfahrens "Performance Regime".</p>