

Alma Mater Studiorum – Università degli Studi di Bologna

SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA

DICAM

CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA CIVILE

TESI DI LAUREA

in

TECNICA ED ECONOMIA DEI TRASPORTI T

**POTENZIALITÀ DI UNA LINEA FERROVIARIA:
CONFRONTO TRA BLOCCO FISSO E BLOCCO MOBILE**

Candidato:
MATTEO MAESTRI

Relatore:
Prof. Ing. LUCA MANTECCHINI

Anno Accademico 2014 - 2015
Sessione II

SOMMARIO

Introduzione.....	4
PARTE PRIMA	
1.1 Il sistema di trasporto ferroviario	5
1.2 La rete ferroviaria.....	6
1.2.1 RFI	6
1.3 I sistemi di circolazione	8
1.3.1 sezioni di blocco	9
1.4 I sistemi di circolazione in Italia	11
1.4.1 blocco telefonico	12
1.4.2 blocco elettrico automatico a correnti fisse	12
1.4.3 blocco elettrico automatico a correnti codificate	13
1.4.4 blocco conta assi.....	20
1.5 Sistemi di sicurezza.....	21
1.5.1 ripetizione dei segnali a bordo	22
1.5.2 SCMT	24
1.5.2.1 Applicazione in Italia	27
1.6 ERTMS	27
1.6.1 ERTMS di livello 1.....	29
1.6.2 ERTMS di livello 2.....	31
1.6.3 ERTMS di livello 3 e il blocco mobile	33
1.6.4 applicazioni in Italia.....	34

PARTE SECONDA

2.1	Introduzione al concetto di capacità	36
2.2	La capacità teorica.....	37
2.2.1	Capacità teorica del blocco mobile	37
2.2.2	Capacità teorica del blocco fisso.....	41
2.2.3	Confronto tra blocco mobile e blocco fisso.....	48
2.3	La capacità reale e i metodi di calcolo	49
2.3.1	Modelli analitici deterministici	51
2.3.2	Modelli analitici probabilistici: il Metodo UIC	52
2.3.3	Modelli analitici probabilistici: il Metodo DB.....	54
2.3.4	Confronto tra i modelli analitici.....	56
2.3.5	Metodi analogici di simulazione	57
2.4	Coefficienti di ritardo D e di stabilità X.....	59
2.4.1	Livelli di servizio	63
2.5	Considerazioni finali sulla capacità.....	66

PARTE TERZA:

3.1	Confronto tra linee convenzionali e linee AV/AC in Italia.....	71
3.2	Legame velocità – capacità	73
	Conclusioni	74
	Bibliografia e sitografia	75

Introduzione

Lo scopo della seguente trattazione è quello di affrontare il tema della capacità di una linea ferroviaria, caratteristica fondamentale di ogni sistema di trasporto.

Nella prima parte andrò a introdurre i concetti basilari che descrivono il sistema ferroviario, funzionali al proseguo della trattazione.

La seconda parte sarà invece incentrata proprio sul concetto di capacità: dopo aver analizzato nel dettaglio tutti i parametri da cui questa dipende, e in che modo vi dipende, descriverò i modelli di calcolo attualmente utilizzati, prestando particolare attenzione al metodo dei coefficienti di ritardo specifico D e di stabilità X . Proporrò inoltre un confronto, prettamente teorico, tra i sistemi di distanziamento basati sul blocco fisso, attualmente utilizzati sulle reti ferroviarie, e un sistema di distanziamento in fase di studio e che non ha ancora trovato applicazioni pratiche: il blocco mobile.

Infine nella terza parte andrò a proporre un confronto, in termini di capacità, tra le linee convenzionali e le nuove linee AV/AC realizzate in Italia.

PARTE PRIMA

1.1 IL SISTEMA DI TRASPORTO FERROVIARIO

Le principali caratteristiche che devono contraddistinguere il trasporto ferroviario, dato il carattere di servizio pubblico e l'importanza che esso assume nel quadro delle attività economiche nazionali, sono le seguenti:

- Rispondenza alle esigenze di traffico: come ogni sistema di trasporto, il sistema ferroviario deve essere in grado di soddisfare la domanda di spostamenti su tutto il territorio di sua competenza;
- Sicurezza d'esercizio: la sicurezza è un requisito fondamentale a cui si fa riferimento durante le fasi di progettazione, manutenzione e organizzazione delle infrastrutture, dei veicoli e dei servizi ferroviari. Il sistema ferroviario ad oggi è uno dei sistemi di trasporto che offre i maggiori livelli di sicurezza ai suoi utenti. Oltre al miglioramento delle caratteristiche dei mezzi, delle infrastrutture e degli impianti di segnalamento utilizzati, un contributo fondamentale al raggiungimento di questo obiettivo è stato fornito dall'evoluzione tecnologica, che ha portato a sviluppare sistemi di sicurezza in grado di controllare la marcia dei treni e intervenire in modo automatico qualora si presentassero situazioni di pericolo. Un ulteriore contributo è fornito dai regolamenti che disciplinano la circolazione dei treni e l'operato del personale ferroviario.
- Capacità: ossia il volume limite di traffico, in termini di mezzi, passeggeri o merci, che può essere gestito, nel rispetto di prefissati livelli di servizio.
- Regolarità: la regolarità della circolazione e la regolarità del servizio costituiscono una necessità oltre che una finalità nell'organizzazione del trasporto ferroviario.
- Rapidità dei servizi: la velocità è un altro dei caratteri funzionali della ferrovia, che assume un'importanza sempre più elevata all'aumentare della distanza. La riduzione dei tempi di percorrenza è infatti una delle caratteristiche che rende più appetibile un sistema di trasporto. Essa trova la sua piena realizzazione sulle nuove linee ad alta velocità AV.
- Costo del viaggio: il servizio ferroviario è un servizio pubblico, dev'essere pertanto accessibile alla maggioranza della popolazione, anche in termini di costi del viaggio. È importante dunque trovare il giusto compromesso tra i costi di gestione e i ricavi, in modo da rendere il sistema economicamente sostenibile e garantirne, al tempo stesso, l'accessibilità alla maggior parte delle persone.

Fra queste caratteristiche esistono forti legami di dipendenza: ad esempio garantire velocità e livelli di regolarità elevati non consente di avere valori elevati di capacità, con un conseguente innalzamento del costo del viaggio. Sarà il gestore della rete a stabilire quali caratteristiche prediligere per ogni linea, in funzione del servizio che vuole offrire.

1.2 LA RETE FERROVIARIA

L'insieme delle infrastrutture di un sistema di trasporto costituisce una rete di trasporto.

Questa ultima ha come naturale rappresentazione quella di un grafo, che può essere definito, in termini generali, come un insieme di rami fra loro connessi nei nodi.

Nel caso ferroviario i nodi sono rappresentati dalle stazioni, dai posti di movimento (ossia gli impianti atti a realizzare incroci e precedenza fra i treni, come le stazioni, ma nei quali non è previsto lo svolgimento del servizio viaggiatori) e dai bivi. Mentre i rami sono i tratti di linea compresi fra due stazioni o bivi. Nel caso di linee a doppio binario, ciascuno dei due binari costituisce un ramo.

La circolazione ferroviaria si svolge infatti su linee dotate di uno o più binari, in particolare si parla di:

- Linea a semplice binario: la circolazione dei treni in entrambi i sensi di marcia avviene sull'unica sede disponibile, attrezzata in modo opportuno.
- Linea a doppio binario: ogni binario è attrezzato e adibito alla circolazione in un unico senso di marcia. Generalmente i treni percorrono il binario di sinistra definito binario legale, l'altro binario è invece definito binario illegale.
- Linea banalizzata: è una linea a doppio binario in cui i due binari sono attrezzati per la circolazione in entrambi i sensi di marcia

In alcuni casi è necessario realizzare linee con più di due binari per garantire una maggiore capacità, a fronte di una domanda particolarmente elevata, o per poter offrire servizi eterogenei: l'utilizzo di più binari consente infatti di poter dividere i diversi tipi di traffico (ad esempio in base alla velocità di percorrenza) che possono così essere serviti ognuno al meglio.

1.2.1 RFI

Per quanto riguarda l'Italia, ad oggi la Rete Ferroviaria Italiana (RFI) comprende 16.726 km di linea, e prevede una configurazione sostanzialmente longitudinale, con le linee principali che si sviluppano nel senso Nord-Sud.

Le linee che compongono la rete sono classificate in base alle loro caratteristiche in:

- Linee fondamentali, caratterizzate da un'alta densità di traffico e da una elevata qualità dell'infrastruttura, comprendono le direttrici internazionali e gli assi di collegamento fra le principali città italiane ;
- Linee complementari, con minori livelli di densità di traffico, costituiscono la maglia di collegamento nell'ambito dei bacini regionali e connettono fittamente tra loro le direttrici principali;
- Linee di nodo, che si sviluppano all'interno di grandi zone di scambio e collegamento tra linee fondamentali e complementari situate nell'ambito di aree metropolitane.

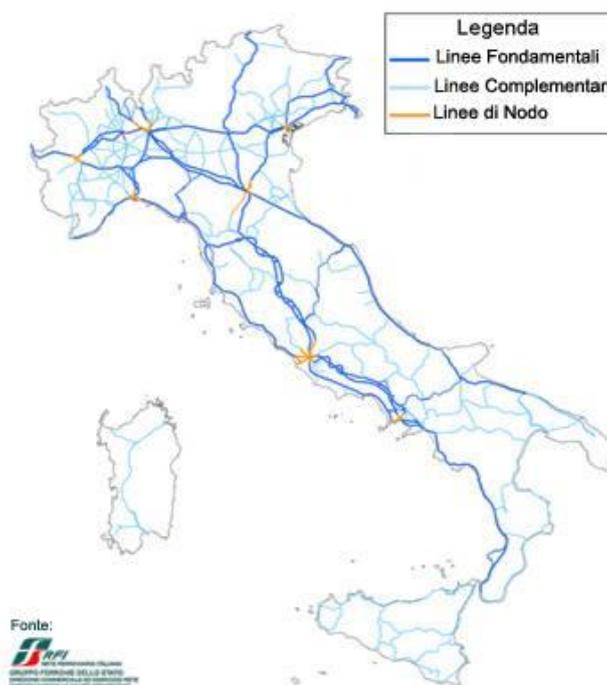


Fig 1.2.1- 1 Rete Ferroviaria Italiana (RFI)

Un ulteriore distinzione viene fatta tra le linee convenzionali e le linee ad alta velocità e alta capacità AV/AC.

Nelle seguenti tabelle riporto i dati relativi al 30 giugno 2015, che descrivono la RFI:

LINEE FERROVIARIE IN ESERCIZIO		Tot 16.726 Km
Classificazione		
Linee fondamentali		6.444 km
Linee complementari		9.339 km
Linee di nodo		943 km
Tipologia		
Linee a doppio binario		7.558 km

Linee a semplice binario	9.168 km
Alimentazione	
Linee elettrificate	11.943 km
- a doppio binario	7.481 km
- a semplice binario	4.462 km
Linee non elettrificate (diesel)	4.783 km

LUNGHEZZA COMPLESSIVA DEI BINARI	24.283 km
Linea convenzionale	22.933 km
Linea AV	1.350 km

IMPIANTI FERROVIARI	
Stazioni con possibilità di servizio viaggiatori	2.212
Impianti di traghettamento	3
Impianti merci	219

TECNOLOGIE INNOVATIVE DI PROTEZIONE MARCIA TRENO (tutte le linee sono attrezzate con uno o più sistemi di protezione)	
Sistemi di telecomando della circolazione (SCC/CTC+DPC)	12.077 km
SCMT - Per il controllo della marcia treno	11.856 km
SSC - Per il supporto alla guida	4.242 km
ERTMS - Per l'interoperabilità su rete AV/AC	654 km

Tabella 1 - Dati relativi alla RFI

1.3 SISTEMI DI CIRCOLAZIONE

Con l'espressione sistemi (regimi) di circolazione, in ferrovia, si intende definire l'insieme dei provvedimenti tecnici ed organizzativi necessari per assicurare il corretto distanziamento fra i treni.

Occorre cioè garantire che un treno non possa raggiungere un altro che lo precede nello stesso senso e, sulle linee a semplice binario, che due treni viaggianti in senso opposto, non possano essere inoltrati, contemporaneamente, sullo stesso tratto di linea.

A tal scopo, il distanziamento tra due treni dovrà dunque essere tale da lasciare, tra un treno e l'altro, uno spazio sufficiente a consentire l'arresto del treno che segue in caso di improvviso arresto del treno che lo precede.

Tale spazio dovrà tenere conto dello spazio S_r percorso durante il tempo di reazione t_r , che va dall'istante della percezione della necessità di arrestarsi all'istante di piena efficienza del sistema

frenante, dello spazio di frenatura S_a necessario al treno per arrestarsi, e di un franco di sicurezza S_0 .

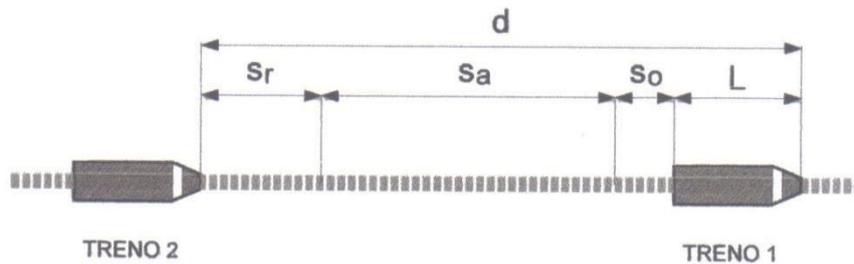


Fig 1.3-1 Distanza di arresto

La distanza tra la testa dei due treni risulta pertanto pari a:

$$d = S_r + S_a + S_0 + L = v * t_r + \frac{v^2}{2a} + S_0 + L$$

avendo indicato con v la velocità, con a la decelerazione media e con L la lunghezza dei treni.

Il distanziamento temporale Δt , ossia l'intervallo di tempo tra il passaggio dei due treni in una stessa sezione di linea, sarà invece pari a:

$$\Delta t = \frac{d}{v} = t_r + \frac{v}{2a} + \frac{S_0 + L}{v}$$

1.3.1 SEZIONI DI BLOCCO

I sistemi di circolazione attualmente in uso prevedono il "distanziamento a spazio" (il distanziamento a tempo non è praticamente più utilizzato).

Nel "distanziamento a spazio" la linea ferroviaria è suddivisa in tratti di lunghezza prefissata, denominati **sezioni di blocco**: la regola fondamentale per la sicurezza della circolazione è che può esserci un solo treno, contemporaneamente, in ogni sezione di blocco.

In questo caso la distanza di sicurezza da mantenere tra due treni sarà maggiore del valore minimo precedentemente calcolato: $d = S_r + S_a + S_0 + L = v * t_r + \frac{v^2}{2a} + S_0 + L$ e dipenderà dalla lunghezza delle sezioni di blocco.

Questo perché i sistemi di "distanziamento a spazio" basati sulla sezione di blocco sono in grado di rilevare lo stato di occupazione di una sezione ma non la posizione effettiva del treno su quella sezione. La posizione del treno è dunque determinata con un errore pari all'intera estensione della sezione di blocco e, di conseguenza, la distanza minima tra due treni che si susseguono dipenderà proprio dalla lunghezza delle sezioni di blocco, come vedremo nel dettaglio più avanti.

All'inizio di ogni sezione di blocco è posizionato un segnale di prima categoria che informa riguardo lo stato di occupazione della sezione: segnale rosso indica che la sezione è occupata, segnale verde indica che la sezione è invece libera e possiamo procedere nella marcia.

A sua volta il segnale di prima categoria dev'essere preceduto da un segnale di avviso, che per l'appunto avvisi il macchinista che la sezione successiva è occupata e che quindi deve arrestare il treno prima di entrarvi: un segnale di avviso giallo indica che la sezione successiva è occupata (precede dunque un segnale di prima categoria rosso), un segnale di avviso verde indica invece che possiamo procedere nella marcia.



Fig 1.3.1-1 Aspetto dei segnali nel caso di sezioni isolate

La distanza fra il segnale di avviso e segnale di prima categoria dev'essere, ovviamente, almeno pari alla distanza di arresto del treno che necessita della maggiore distanza di arresto tra quelli che percorrono la linea, in modo da poter arrestare il treno prima di giungere sulla sezione occupata.

La distanza di arresto, e quindi la distanza minima tra i segnali di avviso e quelli di prima categoria, può essere calcolata con la formula di Pedelucq:

$$Sa = \frac{V_0^2}{\frac{1.09375\lambda c}{\Phi(V_0)} + \frac{0.127}{\Phi(V_0)} \pm 0.235i}$$

Dove: V_0 è la velocità del treno nel momento in cui inizia a frenare, espressa in km/h

λ_c è la percentuale di peso frenato (es 120% $\lambda_c = 1,2$)

i è la pendenza della linea in per mille

Φ è un coefficiente funzione della velocità iniziale V_0 , il cui valore può essere ricavato dalla tabella qui sotto:

V_0	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200
Φ	0.0686	0.0691	0.0696	0.0714	0.0731	0.0742	0.0755	0.0763	0.0771	0.0779	0.0787

Tabella 2 – Tabella del coefficiente Φ , in funzione della velocità, da inserire nella formula di Pedelucq

Come vedremo meglio in seguito, la capacità di una linea ferroviaria aumenta al diminuire della lunghezza delle sezioni di blocco. In particolare la capacità è massima utilizzando sezioni di blocco di lunghezza pari alla distanza di arresto (del treno che necessita della maggiore distanza di arresto tra quelli che percorrono la linea).

In questo caso la funzione di avviso può essere svolta dal segnale di prima categoria della sezione precedente e si parla di **sezioni di blocco concatenate**.



Fig 1.3.1-2 Aspetto dei segnali nel caso di sezioni concatenate

i segnali pertanto non saranno più a 2 aspetti come per le sezioni isolate, bensì a tre aspetti (rosso, giallo e verde).

Proprio per la maggiore capacità garantita le sezioni concatenate vengono realizzate sulle linee ad alto traffico, mentre su quelle a medio e scarso traffico si utilizzano sezioni isolate, con lunghezza che può arrivare anche a 15/20 km, in virtù del loro costo ridotto: sono necessari infatti meno impianti di segnalamento.

In Italia le Ferrovie dello Stato (FS) hanno stabilito la lunghezza delle sezioni di blocco, nel caso concatenato, generalmente, pari a 1350 metri per le linee non AV (valore calcolato in base alla distanza di arresto di treni che viaggiano ai 160 Km/h, stimata, con opportuni margini di sicurezza, tra i 1200 e i 1400 metri) e di 1800 metri per le linee ad alta velocità AV/AC.

1.4 SISTEMI DI CIRCOLAZIONE IN ITALIA

I sistemi di circolazione in funzione attualmente sulle linee della Rete Ferroviaria Italiana (RFI) sono i seguenti:

- Blocco telefonico
- Blocco elettrico manuale
- Blocco elettrico automatico a circuito di binario
- Blocco elettrico automatico conta assi
- Blocco radio (per le linee AV/AC dotate del sistema ERTMS di livello2)

I primi due sistemi prevedono che parte del processo di accertamento dell'occupazione di una sezione di blocco da parte di un treno, e quindi dell'autorizzazione alla marcia dei treni, sia svolto dal personale competente. Tali sistemi sono stati progressivamente sostituiti da regimi automatici, ed ad oggi vengono utilizzati su una percentuale minima della RFI. La scelta di investire in sistemi

automatici è dovuta ai grandi vantaggi che questi comportano: la maggiore sicurezza fornita dalla tecnologia e dall'automazione rispetto a quella garantita dall'uomo; la riduzione dei costi in seguito alla riduzione del personale e agli impianti utilizzati; la riduzione dei tempi di accertamento dello stato di occupazione di una sezione di blocco e quindi dei tempi di immissione dei treni nella sezione di blocco, con un conseguente aumento della capacità della linea.

I sistemi automatici garantiscono un aumento della potenzialità non solo per la riduzione dei tempi operativi ma anche perché permettono di incrementare il numero di sezioni di blocco in cui può essere suddivisa la linea (la relazione tra la capacità e le sezioni di blocco è ben analizzata nella seconda parte del trattato).

1.4.1 BLOCCO TELEFONICO

Il blocco telefonico è un sistema nel quale i segnali disposti lungo la linea sono normalmente disposti a via impedita e vengono posti a via libera, dopo aver ottenuto il consenso, non appena si sia in grado di utilizzarlo.

Lo scambio di informazioni avviene attraverso la trasmissione di dispacci telefonici registrati tra le diverse stazioni o posti di blocco intermedi sulla base di formulari standardizzati.

Sulla rete italiana il blocco telefonico è ormai in disuso: attualmente è impiegato su meno dell' 1% della RFI. Tuttavia rimane uno dei sistemi più utilizzati in condizioni di anomalia o guasto degli altri (regime degradato)

1.4.2 BLOCCO ELETTRICO MANUALE

Il blocco elettrico manuale si basa su un impianto elettrico che pone in collegamento tra loro i posti di blocco, per mezzo del quale la possibilità di disporre a via libera il segnale d'ingresso in ciascuna sezione è subordinata al ricevimento di un consenso elettrico dal posto successivo.

Le relative apparecchiature assicurano che il consenso accordato da ciascun posto al precedente possa essere utilizzato per un solo treno, in quanto questo, entrando nella sezione, si protegge automaticamente agendo su un dispositivo di occupazione (pedale, circuito di binario o simile), che fa disporre a via impedita il segnale d'ingresso nella sezione.

A questo punto il posto a valle non può concedere un nuovo consenso fin quando il treno in marcia sulla tratta non l'abbia liberato agendo su un apposito dispositivo di liberazione.

Le operazioni di richiesta e concessione del consenso vengono svolte dal personale addetto alla circolazione dei treni manualmente, azionando le apposite attrezzature.

Attualmente il blocco elettrico manuale è applicato su una minima percentuale della Rete Ferroviaria Italiana, in fase di progressiva eliminazione in favore dei sistemi dotati di una maggiore automazione come il blocco automatico a circuiti di binario o il blocco automatico conta assi.

1.4.3 BLOCCO ELETTRICO AUTOMATICO A CIRCUITO DI BINARIO

Il blocco elettrico automatico a circuito di binario è un sistema di blocco che permette l'individuazione automatica di un treno in una sezione di blocco mediante un circuito di binario.

Il circuito di binario è un dispositivo costituito da un circuito elettrico a corrente continua (ne esistono però anche dei modelli a corrente alternata impiegati sulle linee elettrificate a corrente continua) che, alimentato da un estremo da un generatore, alimenta all'altro estremo un relè di binario, un apposito dispositivo che rileva per l'appunto il passaggio di corrente. Una parte del circuito è costituita dalle due rotaie della sezione da controllare, per questo motivo devono essere montati dei giunti isolanti lungo i binari: giunzioni di rotaia che interrompono la continuità elettrica tra due rotaie contigue, isolando i circuiti di binario e permettendone quindi il corretto funzionamento.

Il funzionamento del circuito di binario è semplice: quando sulla sezione di blocco non è presente alcun asse l'alimentazione del generatore raggiunge il relè, che risulta eccitato. Quando, invece, nella sezione è presente anche un solo asse, la corrente del circuito viene cortocircuitata e non arriva al relè che risulta diseccitato.

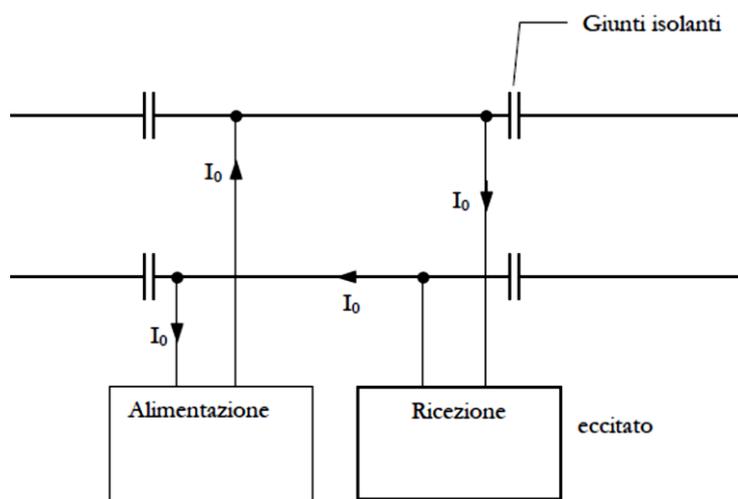


Fig 1.4.3-1 Circuito di binario con sezione di blocco libera

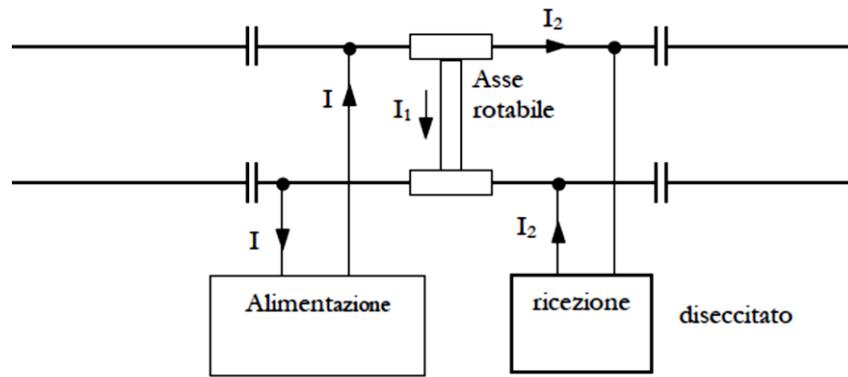


Fig 1.4.3-2 Circuito di binario con sezione di blocco occupata

Il relè è collegato ai dispositivi di segnalamento e ha la facoltà di porli in automatico a via libera o a via impedita a seconda del fatto che sia eccitato o meno, quindi in base allo stato di occupazione della sezione: se eccitato la sezione è libera e il segnale di protezione è verde, se è diseccitato la sezione è occupata e il segnale è rosso.

Nel blocco elettrico automatico i segnali di blocco sono pertanto posti normalmente a via libera, ad eccezione di quelli di protezione delle stazioni, dei bivi o dei passaggi a livello.

In caso di guasto di un circuito di binario al relè non arriva corrente, il segnale di protezione viene posto a via impedita e la sezione è considerata come se fosse occupata. Onde evitare interruzioni del servizio dovuto a guasti di questo tipo, i segnali di blocco automatico sono dichiarati permissivi, nel senso che se a via impedita possono essere oltrepassati dal treno con l'adozione di particolari precauzioni, dopo una sosta di almeno 3 minuti e marciando a vista, a velocità ridotta (inferiore ai 30 km/h), sino a quando il macchinista non riesca ad ottenere informazioni migliori o dalla visione dei successivi segnali o tramite comunicazioni.

La lunghezza dei circuiti di binario è limitata dal fatto che le due rotaie non sono mai perfettamente isolate tra loro: la dispersione tra l'una o l'altra, nel caso di circuiti più lunghi di un paio di chilometri, potrebbe far sì che al relè non arrivi una corrente tale da eccitarlo, compromettendo il funzionamento del sistema. Lunghezze maggiori possono essere realizzate collegando più circuiti di binario tra loro, anche se, come vedremo di seguito, nel caso di sezioni di lunghezza elevata, quindi nel caso di sezioni isolate, si predilige l'utilizzo di sistemi di blocco più economici, come il blocco conta-assi.

Blocco elettrico automatico a correnti fisse

Il primo sistema di blocco elettrico automatico a circuito di binario, definito a correnti fisse, introdotto consente ai treni di ricevere informazioni solamente sulle due sezioni di blocco successive ai treni: un segnale verde indica che le due sezioni successive sono libere, il giallo che la

sezione successiva è l'ultima sezione libera ed è necessario procedere col rallentamento del treno, un segnale rosso che la sezione successiva è occupata e bisogna arrestare il veicolo.

In questo caso il distanziamento minimo tra due treni che viaggiano alla medesima velocità, per sezioni concatenate, affinché il treno che segue veda sempre il segnale verde, è pari a:

$$d_{\min} = 2L + l + f$$

dove L è la lunghezza della sezione di blocco, l la lunghezza dei treni e f un coefficiente di sicurezza (nel caso di treni privi della ripetizione a bordo dei segnali f assume anche un significato legato alla visibilità del segnale stesso che può determinare un anticipo di frenatura da parte del personale di condotta. La distanza di visibilità del segnale generalmente è assunta pari a 150m, per velocità pari o inferiori ai 160 km/h)

Per distanze inferiori potrebbe infatti verificarsi la situazione indicata in figura:

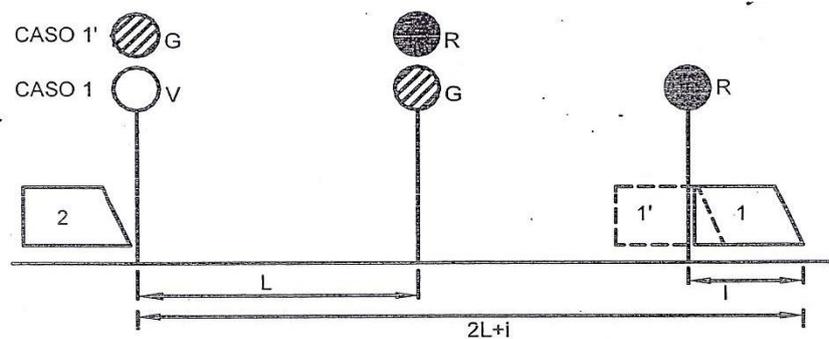


Fig 1.4.3-3 distanziamento minimo con il blocco elettrico a correnti fisse

Dove il treno di testa tratteggiato, a cavallo tra le due sezioni, costringerebbe il treno che segue a rallentare, trovandosi esso di fronte ad un segnale giallo, anche se non c'è n'è una reale necessità.

Nel caso invece di sezioni non concatenate il distanziamento minimo sarebbe pari a:

$$d_{\min} = d_a + L + l + f$$

Dove d_a = distanza tra il segnale di avviso e il segnale di prima categoria (pari almeno alla distanza di arresto maggiore tra i treni che circolano sulla linea)

Tale sistema di blocco è attualmente utilizzato, ma richiede una restrizione per quanto riguarda la velocità massima di percorrenza: in Italia le linee su cui è presente tale sistema possono essere percorse a una velocità non superiore ai 150 km/h, come imposto dalle FS.

Blocco elettrico automatico a correnti codificate

A partire dagli anni 70 venne introdotto un nuovo sistema di blocco elettrico automatico a circuito di binario, definito a correnti codificate.

Come già detto in precedenza la lunghezza delle sezioni di blocco concatenate utilizzate in Italia per linee non ad alta velocità è pari a 1350 metri, valore calcolato in base a treni viaggianti ai 160 km/h, velocità massima raggiungibile prima degli anni '60. In quegli anni infatti iniziarono ad essere realizzati treni che viaggiavano a velocità superiori.

Nacque così il problema riguardo alla distanza di arresto di tali treni: questa infatti risultava essere superiore alla lunghezza delle sezioni di blocco utilizzate.

La realizzazione di nuove sezioni di blocco di lunghezza superiore avrebbe causato una serie di problemi: innanzitutto di tipo economico, si sarebbero dovuti ricostruire i circuiti di binario e sostituire tutti gli apparecchi di segnalamento; il futuro sviluppo di treni a maggiore velocità avrebbe costretto a ripetere nuovamente tutto il procedimento; si sarebbero penalizzati i treni più lenti; inoltre a quelle velocità la percezione visiva del segnale luminoso non poteva più essere garantita.

Il problema fu risolto dalle FS con l'introduzione del blocco automatico a correnti codificate.

Il blocco elettrico automatico a correnti codificate è un sistema di blocco basato sull'impiego di più codici trasmessi sulle due rotaie utilizzate come conduttori di linea, che permette la trasmissione di maggiori informazioni comportando notevoli vantaggi operativi: innanzitutto la possibilità di conoscere lo stato di occupazione di più di due sezioni di blocco successive (come avviene per il blocco automatico a correnti fisse); inoltre permette, sulle locomotive opportunamente equipaggiate, la ricezione induttiva dei codici e delle informazioni ad essi correlati, realizzando la ripetizione in macchina dei segnali di terra e andando così a risolvere il problema della visibilità dei segnali luminosi alle alte velocità.

Blocco a 4 codici: La prima versione implementata è stata il blocco elettrico automatico a correnti codificate con ripetizione in macchina a 4 codici: questa permette di conoscere lo stato di occupazione delle tre sezioni di blocco successive.

In particolare con tale sistema le linee sono attrezzate in modo tale che circolano, nei circuiti di binario, delle correnti codificate secondo 4 codici legati alla situazione di libertà della linea davanti al treno.

A bordo della locomotiva è presente una macchina che capta il codice circolante nella sezione di blocco, attraverso il fenomeno dell'induzione elettromagnetica, e ripete il segnale in cabina indicando al macchinista la situazione dei segnali per tre sezioni di blocco avanti nel senso di marcia.

La sequenza di arresto è la seguente: 270-180-75-AC. Quando la macchina di ripetizione del segnale capta il codice 270, vuol dire che il prossimo segnale che il treno incontrerà è a via libera e

il treno può continuare a viaggiare alla massima. Quando, invece, la macchina capta il codice 180, il macchinista è avvertito che quello superato è l'ultimo segnale a via libera, la successiva sezione avrà infatti un segnale giallo. In presenza del codice 180 il treno deve pertanto iniziare a frenare: in questo caso parte un avviso acustico in cabina, il macchinista deve eseguire il riconoscimento (in mancanza del quale parte il meccanismo di frenatura automatica) e iniziare la manovra di rallentamento. Quando è il codice 75 ad essere captato, vuol dire che la sezione successiva è occupata. In quest'ultima non viene captato alcun codice (AC sta per "assenza di codice").

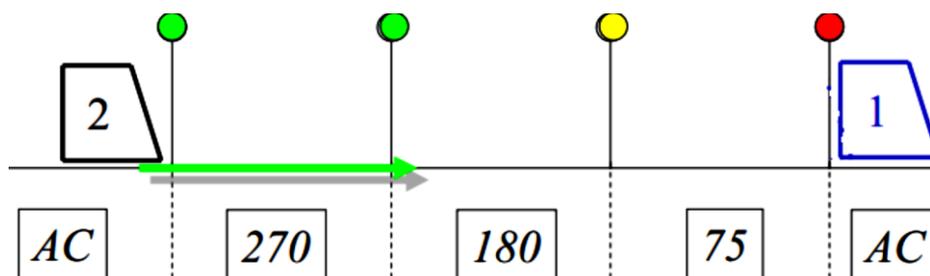


Fig 1.4.3-4 Blocco elettrico automatico a correnti codificate a 4 codici

In caso di guasto o malfunzionamento del circuito di binario di una sezione, il treno non riceverà alcun codice (AC): la sezione viene pertanto considerata come se fosse occupata e il treno arrestato.

È presente inoltre il codice 120 che avverte il macchinista di un rallentamento per una deviate che può essere percorsa a velocità ridotta, pari a 30km/h o 60km/h o 100km/h (la velocità esatta di percorrenza viene suggerita al macchinista dai consueti segnali luminosi). Una sezione con codice 120 è sempre preceduta da una sezione con codice 180 che avvisa della presenza del rallentamento.

Grazie a questo sistema il macchinista può eseguire la frenatura con due sezioni di blocco libere, permettendo quindi di circolare a velocità superiori: nel caso di correnti a 4 codici la velocità massima consentita dalle FS è di 180 km/h (30km/h in più rispetto al sistema a correnti fisse) e il distanziamento minimo tra i treni sarà pertanto pari a: $d_{\min} = 3L + l$

Blocco a 9 codici: per circolare a velocità ancora superiori bisogna adottare il sistema a 9 codici: il meccanismo è il medesimo del sistema a 4 codici implementato però di ulteriori 5 codici.

Tale sistema permette al macchinista di conoscere lo stato di occupazione delle 5 sezioni di blocco successive. In questo la sequenza di arresto è: 270** - 270* - 270 - 180 - 75 - AC.

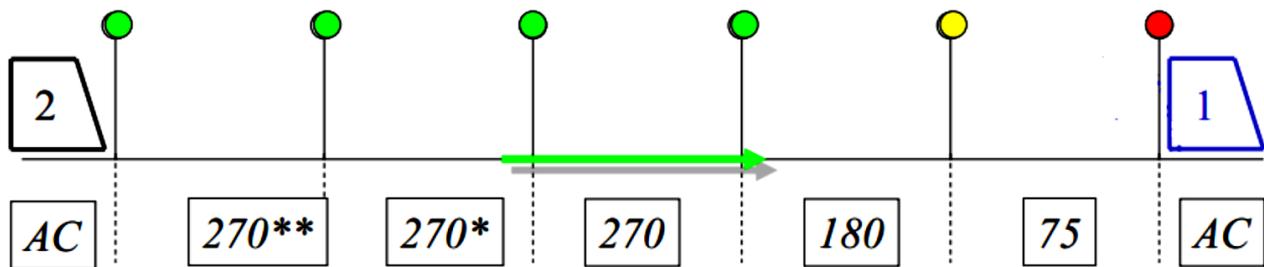


Fig 1.4.3-5 Blocco elettrico automatico a correnti codificate a 9 codici

il codice 270** indica che i tre segnali successivi, nel senso di marcia, sono a via libera; il codice 270* che i due segnali successivi sono a via libera; mentre gli altri codici hanno il medesimo significato visto in precedenza, nel sistema a 4 codici.

Nel blocco a 9 codici sono inoltre presenti i codici 120 (già visto nel blocco a 4 codici), 120* e 180* che indicano tratti di linea percorribili a velocità ridotte.

L'esatto significato dei codici è indicato nella seguente tabella:

AC	Zona occupata o Zona con assenza di segnale
Codice 75	Avviso di via impedita al successivo segnale di prima categoria
Codice 120	Avviso di riduzione della velocità a 30/60/100 km/h al successivo segnale di prima categoria disposto a via libera per itinerario deviato, oppure per percorso da effettuarsi con la predetta riduzione di velocità
Codice 120*	Avviso di riduzione della velocità a 100 km/h al successivo segnale di prima categoria disposto a via libera per itinerario deviato, oppure per percorso da effettuarsi con la predetta riduzione di velocità
Codice 180	Indicazione di via libera per almeno 1350 metri, potendosi verificare alcune situazioni, di cui le principali sono: <ul style="list-style-type: none"> - Avviso anticipato di segnale di prima categoria disposto a via impedita, o a via libera per un percorso deviato a velocità non superiore a 30/60/100 km/h; - Avviso anticipato di riduzione di velocità per rallentamento; - Avviso fine zona codificata (la tratta interessata si rileva dall'Orario di Servizio e secondo le norme del Regolamento Segnali); - Avviso di inizio zona non codificata (la tratta interessata si rileva come al punto precedente); - Avviso e riduzione della velocità per lavori imposti dal codice; - Avviso di variazione della velocità massima della linea in diminuzione in punti singolari;
Codice 180*	Indicazione di via libera per almeno 1350 metri, potendosi verificare le seguenti situazioni: <ul style="list-style-type: none"> - Avviso anticipato di segnale di prima categoria disposto a via libera per un percorso deviato a velocità non superiore a 100 km/h, oppure per un percorso da effettuarsi a velocità non superiore a 100 km/h; - Avviso di riduzione della velocità massima di linea a 150 km/h per lavori;

Codice 270	Indicazione di via libera per un'estensione di almeno 2700 metri
Codice 270*	Indicazione di via libera per un'estensione di almeno 4050 metri
Codice 270**	Indicazione di via libera per un'estensione di almeno 5400 metri

Tabella 3 – Esatto significato dei codici nel caso di blocco automatico a correnti codificate a 9 codici

L'utilizzo comune dei codici 75,120,180,270 fa sì che sulla stessa linea possano viaggiare sia i treni attrezzati con apparecchiature in grado di captare 4 codici, sia quelli in grado di captare 9 codici.

Grazie al sistema a 9 codici la velocità massima di percorrenza è stata portata a 250 km/h. In questo caso il distanziamento minimo tra 2 treni è pari a: $d_{\min} = 5L + l$

Nel caso di blocco a 9 codici, inoltre, si ha inglobato nella macchina di ripetizione dei segnali un sistema di controllo della velocità legato allo stato dei segnali: nel caso di restrizione del segnale l'apparecchiatura di bordo elabora una curva limite di frenatura, funzione della percentuale di peso frenato (un indice che descrive la "qualità" del sistema frenante del rotabile), che il treno deve rispettare per potersi fermare in sicurezza al segnale di via impedita. Una dinamo tachimetrica controlla che la velocità cui il macchinista conduce il treno sia al di sotto dei valori indicati dalla curva di frenatura. Qualora ciò non avvenisse un segnale acustico avvisa il conducente della necessità di rallentare la marcia e attiva un meccanismo di riconoscimento (il conducente dovrà ad esempio premere un pulsante entro un breve tempo dalla comparsa della segnalazione di restrizione della velocità). Se il macchinista non è in grado di effettuare il riconoscimento o se, una volta effettuato il riconoscimento, non riporta la velocità del treno al di sotto dei limiti consentiti, entra in funzione la frenatura automatica. Nel caso venga superato un segnale a via impedita viene azionata automaticamente la frenatura d'emergenza.

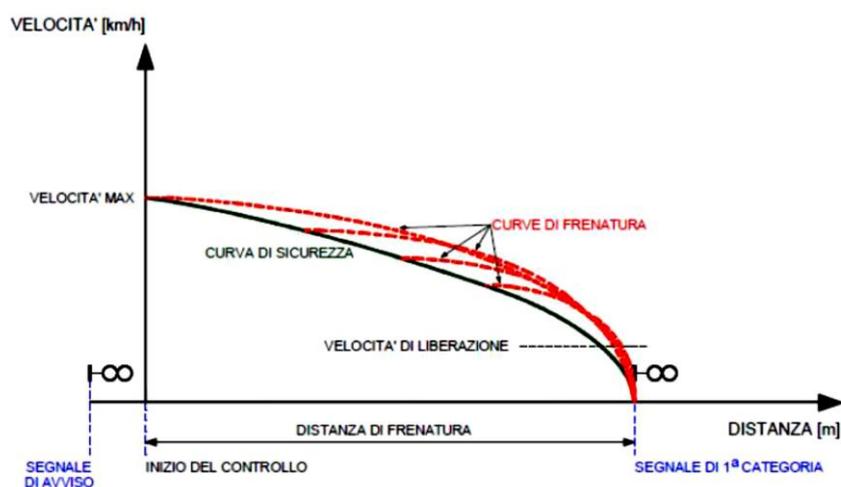


Fig 1.4.3-6 Curva di frenatura

Codice	270**	270*	270	180*	120**	180	120*	120	75
V_{max} [km/h]	250	230	180	150	Non usato	115	100	30, 60, 100	50

Tabella 4 - limiti di velocità in base allo stato del segnale/codice captato

Tale sistema di controllo può essere implementato dal SCMT (sistema controllo marcia treni) di cui parlerò successivamente, garantendo un controllo della velocità non solo in base all'aspetto dei segnali ma anche in funzione delle velocità massime consentite dalle caratteristiche dei treni e della linea.

Il blocco automatico a circuiti di binario è il sistema di circolazione più diffuso attualmente in Italia, utilizzato su circa il 55% della Rete Ferroviaria Italiana.

Sulle linee principali, per esigenze di maggiore sicurezza e disponibilità, è stata pressochè ovunque realizzata la versione a correnti modificate, che rende di fatto indipendente la condotta dalla visibilità dei segnali.

Indipendenza che diviene totale qualora i segnali di linea vengano completamente eliminati, come avvenuto ad esempio sulle linee francesi percorse esclusivamente da treni TGV ad alta velocità, attrezzati con i dispositivi di captazione dei codici, o in Italia sulla linea ad alta velocità Roma-Napoli, che però utilizza sistemi di blocco basati sulle trasmissioni radio.

1.4.4 BLOCCO CONTA ASSI

Sulle linee secondarie, a medio-scarso traffico, dove non è necessario garantire un'alta capacità, vengono utilizzate sezioni di blocco isolate e non concatenate, con lunghezza che può arrivare anche oltre i 15/20 km. Come abbiamo visto i circuiti di binario possono raggiungere una lunghezza limitata a un paio di chilometri, per distanze maggiori sarebbe necessario collegare più circuiti in successione, soluzione economicamente assai impegnativa. Per questo motivo, nel caso di sezioni isolate, si utilizza un sistema di blocco alternativo: il blocco conta assi.

Il blocco elettrico automatico conta assi è un sistema in cui l'informazione relativa alla libertà della via è ottenuta in forma automatica, non più attraverso dei circuiti di binario, bensì attraverso una coppia di pedali elettronici, situati all'inizio e alla fine di ogni sezione di blocco.

Tali pedali sono in grado di rilevare il numero di assi transitati in ingresso e in uscita dalla sezione e, dal confronto tra i due dati, di determinare lo stato di occupazione della sezione: se il numero di assi usciti dalla sezione è pari al numero di assi entrati allora la sezione è libera, in caso contrario la sezione è occupata.

Tale informazione viene inviata ,sotto forma di segnale elettrico, all’impianto di segnalamento, che viene comandato automaticamente: se la sezione è occupata il segnale di prima categoria viene posto automaticamente a rosso.

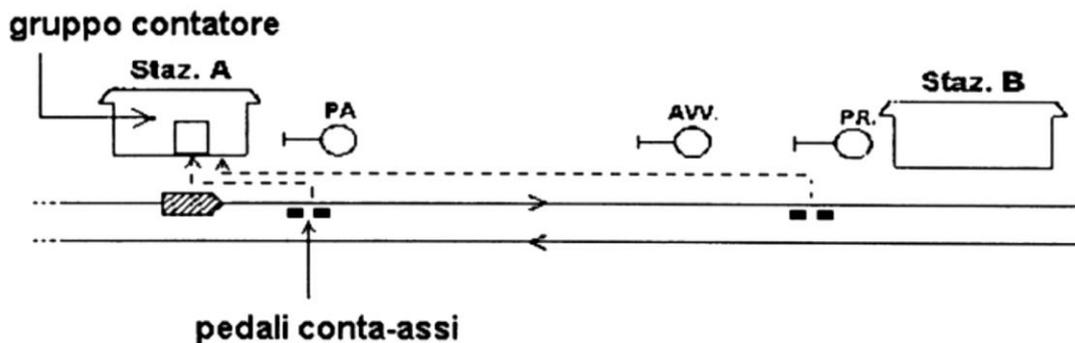


Fig 1.4.4-1 Blocco elettrico automatico conta assi

Utilizzando tale sistema, il distanziamento minimo tra due treni che dev’essere garantito, nel caso di sezioni isolate, è pari a:

$$\delta_{\min} = d_a + L + l + f$$

Dove d_a è la distanza dal segnale di avviso al segnale di prima categoria (pari almeno alla maggiore tra le distanze di arresto dei treni che circolano sulla linea)

Con il blocco conta assi la velocità massima di percorrenza, fissata dalle FS, è pari a 150 km/h, come per il blocco automatico a correnti fisse. Sebbene non permetta velocità elevate, tale sistema presenta un notevole vantaggio dal punto di vista economico: gli impianti e le attrezzature utilizzate hanno costi ben inferiori rispetto al blocco a circuiti di binario.

Proprio la sua ottima economicità di gestione ha fatto sì che in Italia il blocco conta assi abbia trovato un notevole impiego sulla rete secondaria a traffico medio-scarso: attualmente tale sistema è applicato su circa il 35% della Rete Ferroviaria Italiana.

1.5 SISTEMI DI SICUREZZA

La sicurezza è un requisito fondamentale per la progettazione e la manutenzione delle infrastrutture e dei veicoli ferroviari.

Il processo di evoluzione tecnologica, che ha accompagnato lo sviluppo del sistema ferroviario, si è perlopiù indirizzato verso l’attribuzione ai componenti tecnologici degli impianti e dei veicoli dei compiti di sicurezza, inizialmente interamente affidati all’uomo.

L'ipotesi alla base di tale processo è quella, valida in generale, di poter ottenere attraverso l'impiego della tecnologia livelli di sicurezza molto superiori a quelli garantiti dall'uomo.

1.5.1 RIPETIZIONE SEGNALI A BORDO

Un importante passo in questa direzione è stato ottenuto attraverso la realizzazione di sistemi e impianti che consentono la ripetizione dei segnali fissi della linea a bordo delle locomotive, permettendo il superamento della "marcia a vista".

I vantaggi che ne derivano sono molteplici, innanzitutto il superamento di tutti i limiti e le problematiche legate alla visibilità dei segnali: con la marcia a vista condizioni atmosferiche avverse, come nebbia, neve e temporali, o anche semplicemente una distrazione da parte del conducente possono far sì che venga superato un segnale a via impedita sfuggito all'attenzione del macchinista. In secondo luogo è possibile far sì che l'indicazione del segnale sia memorizzata a bordo e quindi che sia possibile osservarla per periodi che non siano limitati al solo transito nella zona di visibilità. Altri vantaggi sono legati alla maggiore velocità di percorrenza permessa, alla possibilità di collegare alle indicazioni dei segnali un'indicazione acustica che avvisi il conducente ad ogni passaggio di segnale e addirittura di collegarle un intervento automatico del sistema di frenatura, come abbiamo visto nel capitolo precedente.

Esistono due tipi di sistemi di ripetizione in macchina dei segnali:

- I sistemi puntiformi o discontinui RSDD (Ripetizione Segnali Digitale Discontinua)
- I sistemi continui RSC (Ripetizione Segnali Continua)

I sistemi discontinui utilizzano dei dispositivi chiamati boe o balise, disposti lungo la linea e collegati agli impianti di segnalamento, in grado di trasmettere informazioni relative allo stato del segnale all'apparecchiatura installata a bordo treno. L'informazione viene memorizzata fino all'arrivo di un'altra diversa. Il problema principale di questo tipo di sistemi è che una volta superata una boa, qualora l'aspetto del segnale dovesse variare, il macchinista ne verrà informato solamente al passaggio sulla successiva boa: la trasmissione delle informazioni è per l'appunto puntuale, discontinua. Il vantaggio, invece, rispetto all'adozione di sistemi continui, oltre all'aspetto economico (l'impiego di circuiti di binario comporta costi decisamente maggiori rispetto all'impiego di balise), è la possibilità di trasmettere ai treni, attraverso le boe, ulteriori informazioni indipendenti dai segnali, come ad esempio la velocità massima del tratto di linea che si sta percorrendo. Grazie a queste informazioni è possibile realizzare sistemi che permettano di controllare la velocità non solo in base all'aspetto del segnale ma anche in funzione dei limiti imposti dal rotabile e dalla linea, come vedremo nel SCMT.

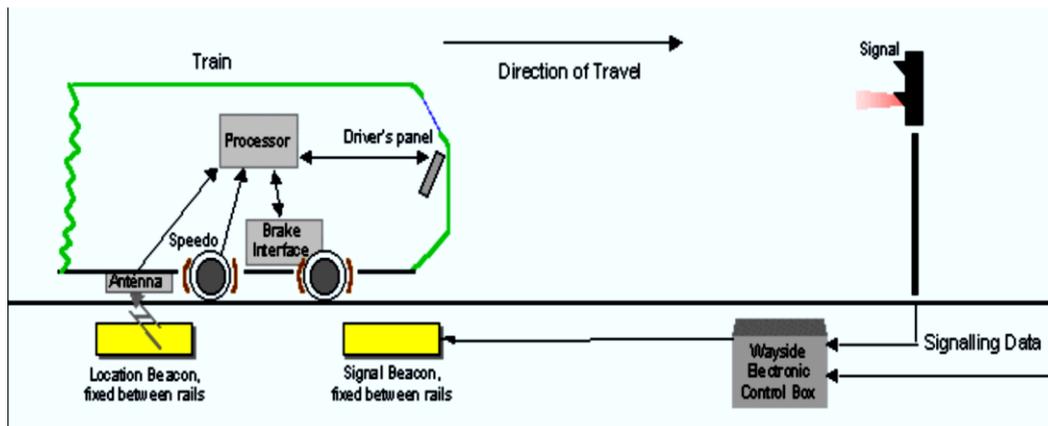


Fig 1.5.1-1 Sistema di Ripetizione Segnali Digitale Discontinua (RSDD)

Le correnti codificate rientrano invece tra i sistemi continui. In questo caso esiste sempre, tramite i circuiti di binario, un collegamento continuo tra terra e bordo, e quindi una variazione dell'aspetto di un segnale viene immediatamente comunicata al macchinista, in qualsiasi momento essa avvenga, garantendo condizioni di sicurezza migliori rispetto ai sistemi discontinui (si pensi ad esempio al caso in cui, una volta superato un segnale a via libera, intervenga una condizione imprevista che porti il segnale successivo a via impedita: con le correnti codificate il conducente del treno sarà immediatamente informato della variazione del segnale e pertanto potrà iniziare la frenatura con un certo anticipo rispetto ad un sistema discontinuo in cui l'informazione verrà trasmessa solamente alla boa successiva). Non solo, tali sistemi in alcuni casi permettono anche di garantire una maggiore qualità della circolazione, rendendoli più adatti per le linee ad alto traffico: nel caso ad esempio che un treno oltrepassi un segnale al giallo, esso può riprendere immediatamente velocità, interrompendo la frenatura, se la ripetizione a bordo gli comunica che il segnale successivo non è più a rosso, evitando quindi di accumulare inutile ritardo e influenzare la marcia dei treni che seguono.

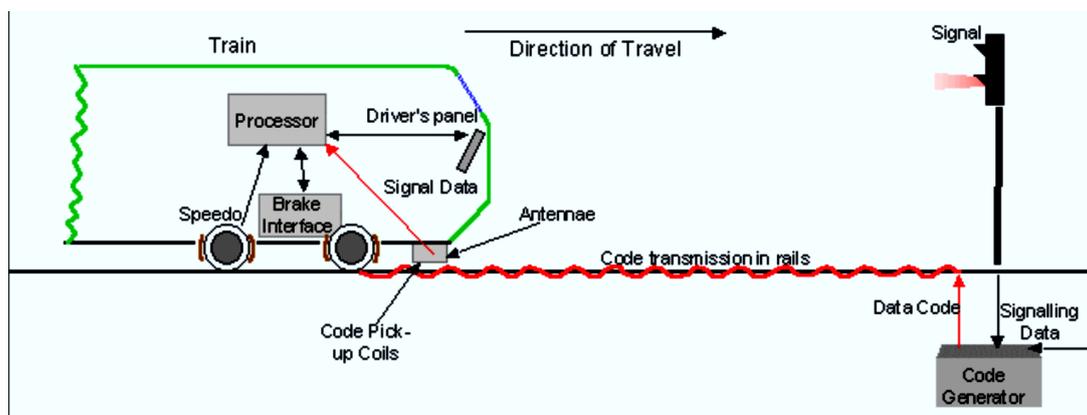


Fig 1.5.1-2 Sistema di Ripetizione Segnali Continua (RSC)

Per entrambi i sistemi sono previsti dei dispositivi, definiti captatori, in grado per l'appunto di captare le informazioni trasmesse dalle boe o dalle correnti codificate. L'apparecchiatura a bordo codifica tali informazioni e le comunica in macchina attraverso delle apposite spie luminose. Osservando tali spie il conducente può dunque conoscere lo stato di occupazione delle sezioni di blocco nelle quali sta per immettersi e regolare la marcia di conseguenza. Un esempio delle spie a bordo, riferite al sistema di blocco automatico a 4 codici, è riportato nella seguente tabella:

Codice captato	Indicazione sul cruscotto della locomotiva
270	Spia verde
180	Spia bianca
120	Sigla RV
75	Spia gialla
AC (assenza di codice)	Sigla AC

Tabella 5 – Indicazioni in cabina dei codici captati

È possibile infine implementare i sistemi di ripetizione continui con sistemi discontinui, ottenendo così una maggiore trasmissione di dati tra terra e bordo, e garantendo una maggiore sicurezza.

1.5.2 SCMT

Un altro elemento fondamentale per garantire la sicurezza della marcia sono gli ATP (Automatic Train Protection), sistemi automatici che controllano la guida del macchinista, proteggendo il treno da eventuali velocità troppo elevate, dal superamento di segnali a via impedita o dal mancato rispetto di condizioni restrittive. In questi casi i sistemi ATP consentono l'intervento della frenatura automatica o di emergenza, sino a riportare la velocità del treno a valori minimi, detti velocità di rilascio, accettabili con le condizioni di circolazione e i livelli residui di rischio, o in alcuni casi addirittura ad annullarla arrestando il treno.

Un esempio di sistema ATP è quello utilizzato nel sistema di blocco automatico a 9 codici.

Le Ferrovie dello Stato hanno elaborato un sistema di controllo innovativo e idoneo all'esercizio con i diversi regimi di circolazione, da applicare a livello nazionale sia sulle linee munite del blocco automatico a correnti codificate sia per quelle che ne sono sprovviste: il sistema SCMT.

Il Sistema Controllo Marcia Treno (SCMT) è un sistema per la sicurezza che attua la protezione della marcia del treno, controllando la velocità massima ammessa, istante per istante, tenendo conto dei vincoli relativi al segnalamento, alle caratteristiche dell'infrastruttura ed alle prestazioni del rotabile, sia in condizioni normali che di degrado, attivando la frenatura d'emergenza, in caso di superamento dei limiti di controllo.

Il sistema è “trasparente” per il macchinista che dovrà continuare ad operare con le abituali modalità di condotta, rispettando le indicazioni ricevute dai segnali della linea e dalle prescrizioni di movimento.

Esso interviene solamente qualora i limiti sopra descritti non vengano rispettati, prima avvertendo il conducente attraverso un segnale acustico e poi intervenendo, qualora non avvenga il riconoscimento del segnale e comunque nel caso il treno non venga riportato al di sotto dei limiti consentiti, azionando la frenatura automatica (nel caso venga superato un segnale a via impedita viene azionata la frenatura d'emergenza)

Il sistema SCMT si compone di due sottosistemi: il sottosistema di terra (SST) e il sottosistema di bordo (SSB) strettamente integrati tra di loro.

Il sottosistema di terra è un sistema discontinuo composto da dispositivi elettronici chiamati balise (in Italia detti anche più comunemente “boe”) posizionati generalmente al centro del binario, in grado di trasmettere determinate informazioni al SSB dei treni che transitano su di essi.



Fig 1.5.2-1 Esempi di balise

A seconda delle informazioni che trasmettono le boe si suddividono in:

- Boe fisse: trasmettono informazioni “fisse”, costanti, quali la velocità massima di percorrenza di ogni tratto della linea (in base alle caratteristiche planimetriche, altimetriche, e alle condizioni del binario) comprese quindi eventuali restrizioni della velocità (per la presenza di deviate, di lavori sulla linea, ecc...) o la distanza dal successivo segnale o dalla successiva boa.
- Boe variabili: trasmettono informazioni variabili, come l'aspetto dei segnali. In questo caso le boe di tipo variabile sono collegate ad unità elettroniche disposte lungo la linea (Lineside Electronics Unit, LEU) che si integrano con il sistema di segnali convenzionali da cui prelevano informazioni riguardo il loro aspetto, in base alle quali comandano le boe.

Le balise in genere devono essere installate a coppie per poter distinguere la direzione di marcia del treno, soprattutto nel caso di binari percorribili in entrambi i sensi di marcia.

Balise in più, fino a 8 per gruppo, sono richieste se il volume di informazioni da trasmettere è molto elevato.

Ogni gruppo di balise è chiamato Punto Informativo (PI)

Di massima una balise non ha bisogno di alimentazione esterna in quanto è attivata per via induttiva dal passaggio di un apposito dispositivo montato, in genere, sotto la cabina di guida del rotabile che percorre la linea. In conseguenza dell'attivazione la balise trasmette le sue informazioni al sottosistema di bordo del treno. Il sistema è in grado di funzionare in maniera affidabile fino alla velocità di 500 km/h.

Il sottosistema di bordo acquisisce le informazioni trasmesse dal SST attraverso un captatore (un' antenna) e le invia al computer di bordo. Quest'ultimo elaborando i dati forniti dalle boe e i dati relativi al treno su cui è installato (percentuale peso frenato, lunghezza, ecc) è in grado di verificare, istante per istante, se la velocità del rotabile è al di sotto di quella consentita.

Qualora ciò non avvenga il conducente viene avvertito tramite un segnale acustico, come già descritto in precedenza, e il computer di bordo elabora una curva di frenatura, compatibile con le caratteristiche del rotabile (in particolare con la percentuale di peso frenato, indice della "qualità del sistema frenante del treno) da rispettare per riportare la velocità del treno al di sotto dei limiti consentiti.

Se tale curva di frenatura non viene rispettata allora entra in azione la frenatura automatica.

Il controllo della velocità di marcia previsto dal SCMT, di regola, prevede il controllo della velocità del convoglio fino ad un tetto di 30 km/h detto velocità di rilascio, ossia, in caso di arresto previsto (segnale a via impedita), il sottosistema di bordo controlla la curva di velocità fino alla suddetta velocità. Il punto della velocità di rilascio è posto all'incirca 200 metri prima del segnale disposto a via impedita.

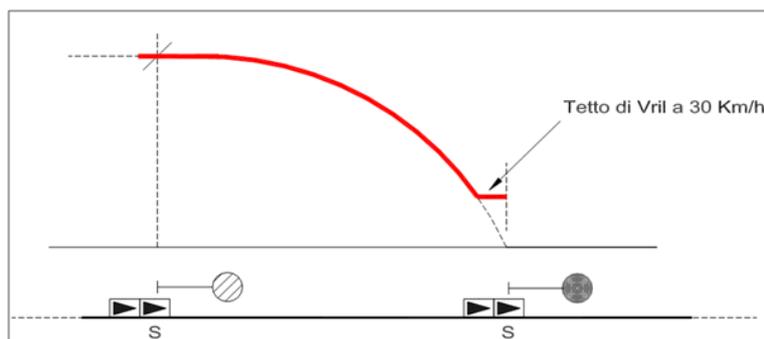


Fig 1.5.2-2 Velocità di rilascio nella curva di frenatura

Ovviamente se il macchinista supera il segnale disposto a via impedita, nel momento esatto il convoglio oltrepassa il segnale, cioè il relativo PI, si attiva la frenatura d'urgenza del convoglio.

Per alcuni punti della linea particolari (bivi, posti di comunicazioni, posti e stazioni di passaggio da doppio a semplice binario, ecc.), nei casi individuati con criteri stabiliti dagli Uffici Centrali di RFI, il tetto della velocità di rilascio viene prudenzialmente abbassato a 10 km/h.

Inoltre il sistema è strutturato in modo tale che al passaggio su una boa viene trasmessa l'indicazione della distanza della boa successiva. Tale sistema è detto "catena di appuntamento" e permette la verifica della completa ricezione dei messaggi. In caso di guasto o indebita rimozione di una boa il SSB è quindi in grado di rilevare la mancata ricezione dati e di far intervenire la frenatura d'urgenza.

Il sistema SCTM può essere integrato al blocco automatico a correnti codificate permettendo un controllo della velocità non più solo in funzione della restrizione dei segnali ma anche dei vincoli imposti dalla linea e dal rotabile.

1.5.2.1 APPLICAZIONE IN ITALIA

Il sistema SCTM è stato adottato da parte delle FS su tutte le principali linee della rete italiana (per un'estensione di 11.856 km al 30 giugno 2015) ad eccezione delle linee ad alta velocità/alta capacità dove sono applicati sistemi di controllo più adeguati.

Una versione semplificata dell' SCTM, il "sistema di supporto alla condotta" SSC, è invece utilizzato sulle linee secondarie, a scarso traffico e percorribili a velocità non superiori ai 150km/h (per un'estensione di circa 5000 km della RFI)

Il sistema SCTM è un sistema di controllo innovativo, compatibile con il nuovo standard europeo di interoperabilità tra le reti ferroviarie (**ERTMS**- European Rail Traffic Management System di primo livello).

1.6 ERTMS

La commissione dell'Unione Europea, agli inizi degli anni '90, mise in evidenza che una delle principali ragioni che ostacolava il rilancio del sistema di trasporto ferroviario in Europa era la presenza di importanti differenze nei sistemi di circolazione, di controllo e di sicurezza adottati nei vari paesi europei. La ragione di queste differenze è essenzialmente storica: Le ferrovie europee in origine nacquero come entità nazionali separate e si svilupparono basandosi sui fornitori nazionali, prestando poca attenzione all'interoperabilità. Ciò ha fatto sì che in ogni nazione si sviluppassero diversi sistemi di circolazione, diversi sistemi di controllo della marcia, diversi sistemi di segnalamento perlopiù incompatibili con quelli degli altri Paesi. Per questo motivo, per poter spostarsi da una paese all'altro, era necessario cambiare alla frontiera il materiale rotabile e il personale di macchina, o in alternativa realizzare treni con le diverse apparecchiature necessarie per circolare nei due differenti stati ed istruire il personale sulle diverse modalità di circolazione, cosa economicamente assai svantaggiosa.

Con l'avvento dell'integrazione europea venne a definirsi la sempre più crescente necessità di stabilire delle norme progettuali comuni che permettessero ai singoli vettori del trasporto ferroviario la libera circolazione in tutte le reti ferroviarie dei Paesi aderenti.

A tal scopo nel 1994 la Commissione Europea decise lo sviluppo di un sistema di controllo unificato europeo: lo "European Rail Traffic Management System" (ERTMS).

Tale sistema, da considerarsi tra le più significative innovazioni introdotte nel panorama ferroviario, consente la circolazione di treni diverse nazionalità sulla base di informazioni comuni, definite con un linguaggio comune, gestite con componenti interoperabili comuni a terra e a bordo. In particolare vengono definite le modalità di scambio delle informazioni di segnalamento tra gli impianti a terra e i treni, identificando le tecniche di trasmissione da utilizzare e il formato dei messaggi.

Con l'installazione a terra e a bordo di ERTMS i vincoli per la circolazione internazionale, che derivano dalle diversità tra i sistemi attualmente in uso nei vari Paesi, vengono sostanzialmente rimossi.

I vantaggi nell'adozione di tale sistema, dal punto di vista ferroviario, sono molteplici: ad esempio, oltre all'interoperabilità, viene garantita una maggiore sicurezza, un migliore livello di servizio sia per il trasporto merci sia per il trasporto passeggeri e si apre il mercato europeo della produzione ferroviaria ad una competizione estesa a livello europeo.

In particolare, per quanto riguarda la sicurezza con il sistema ERTMS viene introdotto l'Automatic Train Control (ATC), un sistema di controllo automatico della marcia del treno che a partire dagli apparati dell'Automatic Train Protection (ATP), descritto nei capitoli precedenti, ne realizza l'evoluzione tecnica e funzionale verso il controllo di velocità a bordo, in modo più possibile completo, elevando per l'appunto i livelli di sicurezza e regolarità della marcia, attraverso una gestione migliore e anticipata delle diverse restrizioni che si possono presentare lungo la via, e una condotta più ergonomica del guidatore.

L'ATC ha quindi il compito di proteggere la marcia del treno nei confronti di determinati vincoli e regole di condotta che comprendono: le caratteristiche del rotabile, le caratteristiche della linea, il distanziamento dei treni, anomalie o particolari stati degli impianti di segnalamento. Tutte le informazioni sono fornite da terra, in modo continuo e discontinuo, ed elaborate dal sistema di bordo EVC (Euro Vital Computer) il quale fornisce a bordo informazioni continue sulla velocità massima ammissibile (a differenza del sistema SCTM che risultava "invisibile" per il conducente, in questo caso le informazioni sono visualizzate in macchina, in un linguaggio standard, sul cruscotto DMI) e, nel caso di superamento di quest'ultima, effettua la regolazione della velocità operando, se necessario, la frenatura d'emergenza.

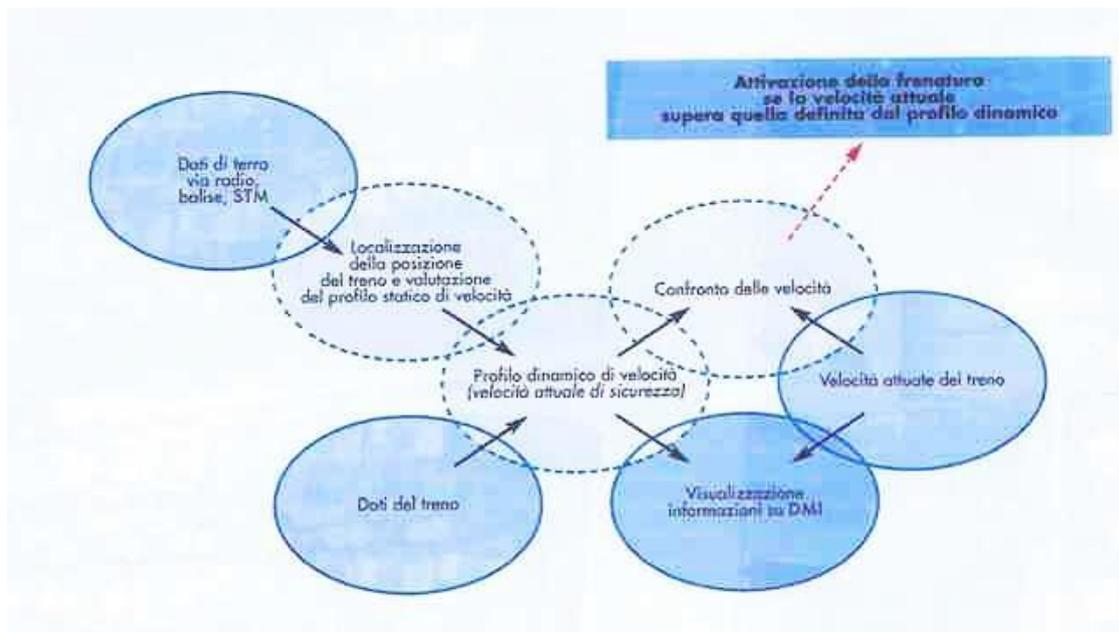


Fig 1.6-1 Funzionalità del sistema ERTMS/ETCS

Nell'ambito dell' ERTMS si distinguono tre livelli operativi per permettere ad ogni ente ferroviario nazionale di stabilire il livello maggiormente appropriato: alle proprie infrastrutture, alle prestazioni volute e alle proprie strategie di investimento.

1.6.1 ERTMS di livello 1

Il primo livello di applicazione dell' ERTMS utilizza, per le trasmissioni a bordo delle informazioni a terra, una trasmissione di tipo discontinuo attraverso boe di tipo fisso e variabile (il cui funzionamento è stato spiegato nel paragrafo relativo al sistema SCMT) conformi alle disposizioni europee (eurobalise), opportunamente posizionate e adeguatamente collegate agli impianti di segnalamento.

Per avere una trasmissione di informazioni meno discontinua è possibile installare tra le boe dei dispositivi denominati euroloop: cavi radianti di segnalamento, opportunamente stesi lungo il binario (di norma tra le rotaie ma in alcuni casi anche all'esterno di esse) in grado di fornire al treno un' informazione anticipata di un aspetto di segnale o altra informazione di boa a valle, in modo da "riempire" con specifici dati informativi i tratti di binario privi di informazione, come nel caso, per esempio, di assenza del blocco automatico a correnti codificate. A differenza delle boe, che forniscono informazioni al treno solo quando sono energizzate nel momento del transito su di esse, il loop è alimentato dall'impianto di terra e può quindi fornire informazioni al treno anche quando esso è fermo, per esempio, a monte di un punto protetto (segnale o altro) in cui non potrebbe ricevere le stesse informazioni dalle boe ancora da incontrare o già oltrepassate.

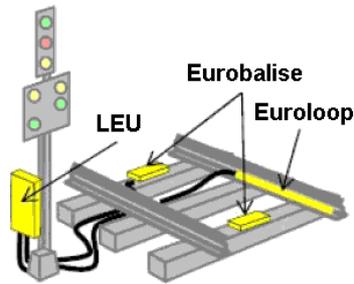


Fig 1.6.1-1 Esempio di Euroloop ed Eurobalise

Una delle caratteristiche dell' ERTMS è propria quella di sovrapporsi ai sistemi di segnalamento e di circolazione già presenti, e non di sostituirli, in modo da consentire la coesistenza del traffico nazionale e di quello interoperabile sulla stessa linea.

I contenuti informativi trasmessi dalle boe e le modalità della loro codifica e della loro allocazione nel telegramma sono standard definiti nelle specifiche ERTMS/ETCS. Tra queste informazioni compaiono anche le autorità al movimento (rappresentate dalla distanza dal punto caratterizzato da condizioni restrittive e dalla velocità massima consentita in quel punto) non più affidate ai sistemi di circolazione tradizionali.

Il sistema di bordo EVC elaborerà i dati ricevuti dalle boe a terra e, confrontandoli con i dati del rotabile, monitorerà la velocità del treno istante per istante, calolerà le opportune curve di frenatura ed azionerà la frenatura automatica laddove necessario.

Nel primo livello rimane facoltativo l'utilizzo a bordo del treno di una interfaccia uomo-macchina, di tipo innovativo, MMI (Man Machine Interface). Per questo livello è quindi necessario garantire l'interoperabilità a livello tecnico ma non a livello operativo. L'interoperabilità tecnica richiede un'unica definizione tecnologica standard di interfaccia tra la linea e il treno, garantendo il "dialogo" almeno fra le apparecchiature tecniche; l'interoperabilità operativa richiede inoltre che, tramite l'uso di interfacce standard e regole comuni di guida, uno stesso macchinista sia in grado di operare nei diversi paesi ignorandone i diversi tipi di segnalamento laterale.

La verifica dell'integrità del treno e il rilevamento della posizione sono affidati a sistemi di rilevamento convenzionali: i circuiti di binario.

**ERTMS/ETCS - livello 1 -
Integrazione con i segnali ottici, blocco fisso**

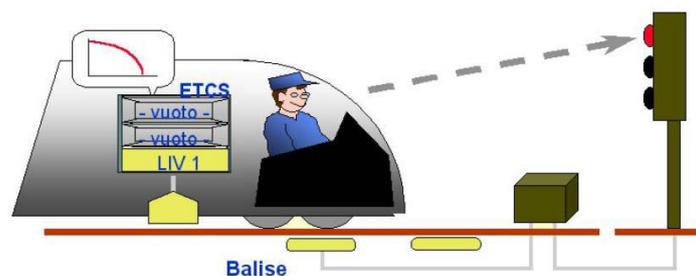


Fig 1.6.1-2 ERTMS di livello 1

1.6.2 ERTMS di livello 2

Il secondo livello d'applicazione utilizza, per la trasmissione a bordo delle informazioni di terra, una trasmissione di tipo continuativo attraverso collegamenti radio in sicurezza con un Radio Block Centre (RBC), che centralizza le informazioni dell'intera linea, e il treno.

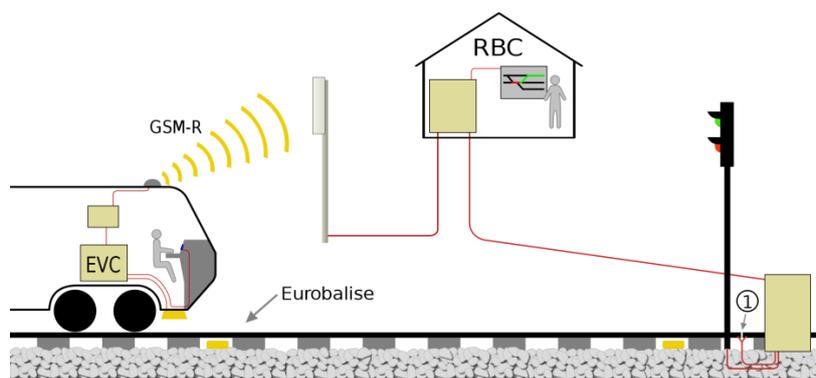


Fig 1.6.2-1 Sistema Radio Block Center (RBC)

I Radio Block Centre sono adeguatamente collegati agli impianti di segnalamento che costituiscono la sorgente informativa (apparati centrali) in base alla quale vengono fornite le autorità al movimento ai treni, realizzando il cosiddetto "blocco radio" (utilizzato attualmente in Italia per le linee AV/AC)

L'autorizzazione al movimento, assieme a tutte le informazioni relative alla linea (come velocità, vincoli relativi al percorso, possibili rallentamenti temporanei e quant'altro sia necessario a mantenere il corretto distanziamento tra i treni in circolazione), viene trasmessa al veicolo in continuità attraverso il sistema trasmissivo GSM-R (Global System for Mobile Communication-Railways): un GSM dedicato esclusivamente al trasporto ferroviario (Railways) per comunicazioni a voce e trasmissione dati in sicurezza.

Per la trasmissione sono utilizzate antenne collegate al Radio Block Centre opportunamente posizionate lungo linea. I contenuti informativi dei messaggi radio e le modalità della loro codifica e della loro allocazione nel telegramma trasmesso sono standard definiti nelle specifiche ERTMS/ETCS.

Per quanto riguarda la tecnologia di bordo l'ERTMS/ETCS di livello 2 è caratterizzato da apparecchiature in sicurezza che consentono al macchinista di condurre il treno avvalendosi esclusivamente delle informazioni trasmesse dal RBC al sottosistema di bordo EVC (European Vital Computer) visualizzate su uno schermo che fa parte dell'interfaccia uomo-macchina MMI o DMI (Driver Machine Interface).



Fig 1.6.2-2 Driver Machine Interface (DMI)

Il DMI È un cruscotto, unificato a livello europeo, che oltre alla velocità effettiva e alla distanza libera a valle del treno fornisce al macchinista indicazioni continue sulla velocità massima consentita al treno. Con tali informazioni (Full Supervision), il sottosistema di bordo attua le azioni opportune per garantire in sicurezza la marcia del treno.

La verifica dell'integrità del treno e il rilevamento della posizione è sempre ottenuta attraverso i circuiti di binario. Le boe, che in questo caso sono solo di tipo fisso, servono per "confermare" la posizione rilevata dai circuiti di binario.

Le esatte posizioni dei treni, la direzione di marcia e tutte le altre informazioni necessarie vengono trasmesse automaticamente dai treni al Radio Block Centre a intervalli determinati. Il movimento dei treni è così monitorato in continuità per mezzo dei RBC.

Da un punto di vista economico il sistema risulta meno oneroso rispetto ad altri in quanto scompare la necessità dei circuiti di binario codificati in grado di trasmettere informazioni a bordo dei treni, dei segnali fissi luminosi (lo stato dei segnali è percepito dal macchinista direttamente in cabina) e di quanto ad essi connesso. Per contro è richiesta la presenza di un certo numero di Stazioni Radio Base BTS per garantire un regolare flusso di dati tra terra e treno.

Il sistema permette la circolazione, sulle linee ferroviarie attrezzate con ETCS di 2° livello solo ai rotabili attrezzati con ETCS-2° e GSM-R, mentre ne esclude i mezzi tradizionali in grado di circolare mediante segnalamento a terra. Tali rotabili tuttavia sono in grado di circolare su tutte le linee attrezzate con apparecchiature di livello inferiore.



Fig 1.6.2-3 ERTMS di livello 2

1.6.3 ERTMS di livello 3 e il blocco mobile

Si è definito anche un terzo livello del sistema ERTMS che tuttavia ad oggi non è ancora stato applicato.

Tale sistema vede il superamento del distanziamento a spazio basato sulle sezioni di blocco e l'introduzione del blocco mobile: la distanza minima tra i treni è considerata variabile istante per istante e funzione solamente dello spazio di frenatura, che può essere calcolato conoscendo l'esatta posizione dei treni sulla linea e la loro velocità di percorrenza.

Il rilevamento della posizione del treno è affidata al sistema di bordo, per esempio attraverso un sistema GPS ed edometro, e confermata a terra da boe di tipo fisso. Scompaiono dunque i sistemi di rilevamento tradizionali (i circuiti di binario).

Tutte le informazioni riguardo alla posizione esatta e alla velocità di percorrenza dei treni vengono trasmesse al Radio Block Center che calcola le distanze minime, istante per istante, tra i treni su tutta la linea e trasmette loro le autorità al movimento.

La trasmissione tra il RBC e il sistema di bordo avviene in modo continuo tramite GSM-R.

L'adozione di questo sistema porterebbe numerosi vantaggi: l'introduzione del blocco mobile andrebbe a massimizzare la capacità della linea e permetterebbe inoltre, attraverso una strategia di controllo della velocità, di modulare il distanziamento dei treni per far fronte a particolari situazioni di congestione sulla linea si otterrebbe un notevole vantaggio economico riducendo al minimo gli impianti fissi di segnalamento (tutte le informazioni relative vengono fornite al macchinista direttamente in cabina) e dei circuiti di binario.

Tuttavia il sistema presenta alcune problematiche che devono essere risolte prima di poterlo vedere applicato: l'eliminazione dei circuiti di binario fa sì che l'integrità del treno debba essere valutata dal sistema di bordo, problema che ad oggi non ha ancora trovato una soluzione soddisfacente; inoltre l'introduzione del blocco mobile comporterebbe una variazione delle norme e dei regolamenti d'esercizio ancora da valutare.

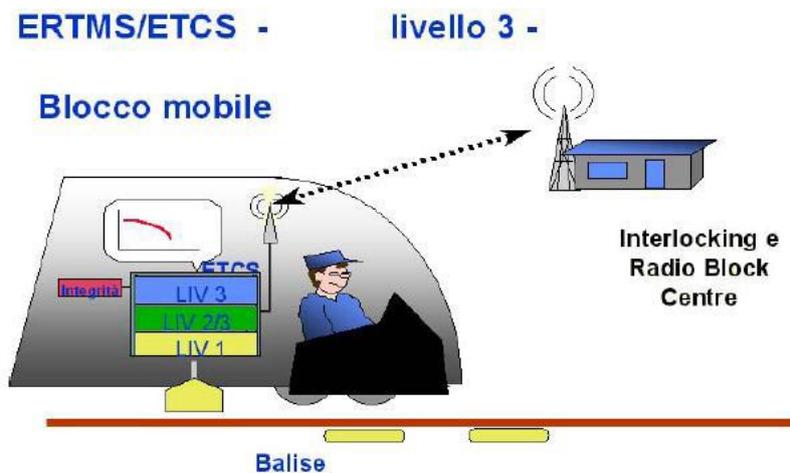


Fig 1.6.3-1 ERTMS di livello 3

1.6.4 ERTMS IN ITALIA

Il sistema ERTMS è attualmente utilizzato in diversi Paesi europei: Italia, Francia, Germania, Spagna, Inghilterra, Olanda e svizzera sono solo alcuni di questi, mentre altri paesi come l'Ungheria si stanno adeguando alla versione di primo livello.

Tutti questi paesi si impegnano ad adottare il sistema ERTMS (rispettando i criteri per l'interoperabilità stabiliti in sede europea con la direttiva 96/48/EC) nel caso di realizzazione di nuove linee ad alta velocità/alta capacità e nel caso di rinnovamento di quelle già esistenti.

In particolare per quanto riguarda l'Italia, siamo stati fra i primi paesi in Europa ad adottare il sistema ERTMS di secondo livello sulle linee AV/AC. Attualmente il sistema è attivo su 654 km della RFI (dati relativi al 30 giugno 2015), mentre circa 10 600km (tra linee tradizionali e AV/AC) sono coperte dalla rete GSM-R.

Per quanto riguarda le linee convenzionali, invece, le Ferrovie dello Stato si stanno adoperando per rendere compatibili con il primo livello dell'ERTMS tutti i tratti dotati del sistema SCMT (che per i sistemi di terra e di bordo utilizzati si avvicina molto all'ERTMS di primo 1 livello) che, come detto in precedenza, comprendono la maggior parte della RFI per un'estensione di circa 11800km.

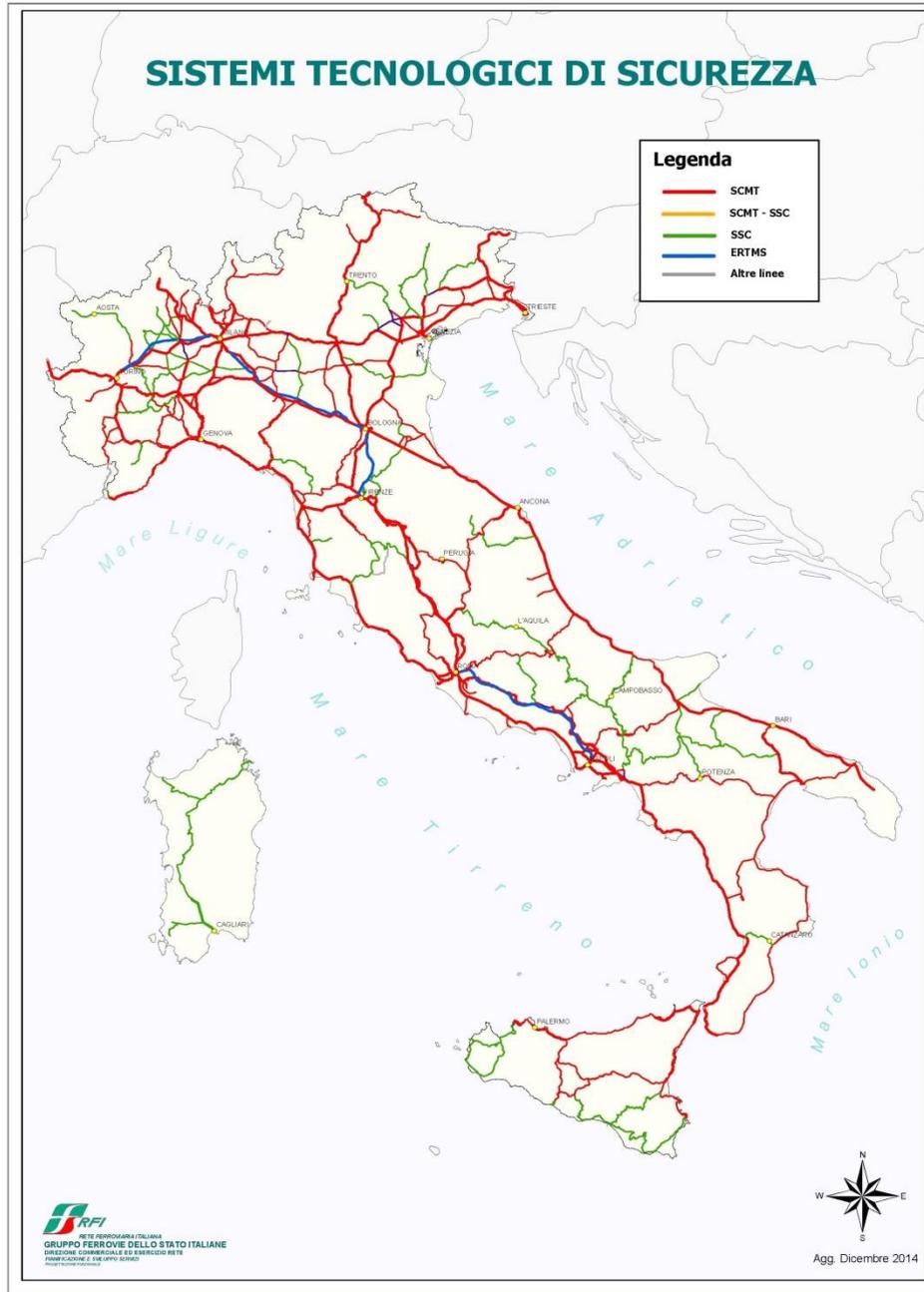


Fig 1.6.4-1 Sistemi di sicurezza della RFI (al 30 giugno 2015)

PARTE SECONDA

2.1 INTRODUZIONE AL CONCETTO DI CAPACITÀ

Abbiamo visto che una rete di trasporto si può definire, in termini generali, come un insieme di rami fra loro connessi nei nodi.

Ad una rete così definita viene assegnato uno stato circolatorio rappresentato dall'insieme dei flussi o correnti delle unità di traffico (treni) che circolano su ciascun ramo e attraverso ciascun nodo.

Circoscrivendo, per comodità, l'analisi ai rami (il concetto può essere esteso con alcuni adattamenti anche ai nodi), il flusso può essere descritto in termini di:

- Portata q che rappresenta il numero di treni che transitano in un punto generico del ramo nell'unità di tempo (treni/ora o treni/giorno)
- Densità K che rappresenta invece il numero di treni presenti, in un istante generico, su un tratto unitario del ramo (treni/km)

Queste due grandezze hanno un limite massimo denominato **capacità C** , che rappresenta il carico massimo sopportabile dal ramo.

Esprimendo il flusso in termini di portata, come farò nel seguito della trattazione, la capacità rappresenterà quindi il *numero massimo dei treni che possono transitare in un punto generico del ramo nell'unità di tempo*.

Come vedremo in seguito, non è possibile assegnare un valore assoluto di capacità ad una linea ferroviaria, bensì una pluralità di valori dipendenti da alcuni variabili (fiche UIC 406: *Capacity as such does not exist. Railway infrastructure capacity depends on the way it is utilised*).

È necessario inoltre distinguere i concetti di capacità teorica e capacità reale:

- La **capacità teorica** rappresenta il numero di circolazioni possibili nell'unità di tempo, assumendo delle condizioni imperturbate: treni della stessa categoria, con stesse velocità e con il minimo distanziamento possibile. Il valore così determinato rappresenta il limite superiore, il massimo valore di capacità ottenibile. La capacità teorica tuttavia non trova alcun fine pratico dal momento che è calcolata considerando condizioni di esercizio ideali: la minima perturbazione del flusso infatti metterebbe in crisi l'intero traffico sulla linea con un effetto a catena.
- La **capacità reale** rappresenta invece il volume limite di traffico che può essere effettivamente gestito su una linea, a determinati livelli di regolarità, considerando le condizioni reali d'esercizio (circolazione mista, ritardi, rallentamenti, ecc.)

È inoltre opportuno introdurre il concetto di capacità utilizzata, ossia la quota parte della capacità reale effettivamente usata da un sistema ferroviario, in base al programma d'esercizio svolto.

La differenza tra la capacità reale e la capacità utilizzata prende il nome di capacità residua: essa rappresenta la capacità disponibile per poter soddisfare nuova domanda.

2.2 CAPACITÀ TEORICA

Un valore generico e puramente teorico della capacità può essere calcolato introducendo le seguenti ipotesi:

- Trascurabilità degli effetti al contorno: i valori di flusso e capacità considerati si riferiscono a punti del ramo sufficientemente distanti dai nodi che questo collega;
- Continuità del flusso: lungo il ramo non si hanno variazioni del flusso ($q = \text{costante}$);
- Omotachicità del flusso: i treni viaggiano tutti alla stessa velocità;
- Omogeneità del flusso: i treni hanno tutti le stesse caratteristiche in termini di lunghezza e accelerazione/decelerazione;

Nel rispetto di tali ipotesi possiamo definire il flusso e la capacità teorica di una linea ferroviaria a doppio binario attraverso le seguenti formule:

$$q = \frac{1}{\Delta T} = \frac{v}{\delta} \quad C = \max q = \frac{1}{T_{min}} = \frac{v^*}{\delta_{min}}$$

Dove ΔT = distanziamento temporale tra due treni consecutivi

ΔT_{min} = distanziamento temporale minimo tra due treni consecutivi

δ = distanziamento spaziale tra due treni consecutivi

δ_{min} = distanziamento spaziale minimo tra due treni consecutivi

v^* = velocità critica (un particolare valore della velocità associato al raggiungimento della capacità) uguale, per ipotesi, per tutte le unità di traffico.

Andremo ora a valutare, nello specifico, i valori di capacità nel caso di blocco mobile e di blocco fisso, e a proporre un confronto tra i due sistemi di circolazione in base ai risultati ottenuti.

2.2.1 CAPACITÀ TEORICA DEL BLOCCO MOBILE

Come già spiegato in precedenza, il blocco mobile è un sistema di "distanziamento a spazio" non più basato sulla suddivisione della linea in sezioni di blocco di lunghezza prefissata: il distanziamento minimo tra due treni successivi è funzione solamente dello spazio di frenatura, variabile istante per istante, calcolato in base alla velocità di circolazione dei treni e del loro sistema frenante (decelerazione).

In questo caso il distanziamento minimo tra due treni successivi sarà pari alla somma dello spazio di frenatura (variabile) e della lunghezza del treno L , con l'aggiunta di un franco di sicurezza f .

$$\delta_{\min} = \text{spazio di frenatura} + L + f$$

Lo spazio di frenatura, in prima approssimazione, si può considerare funzione della velocità v a cui inizia la frenatura e della decelerazione (ipotizzata costante) γ del convoglio, secondo la formula:

$$S_{\text{frenatura}} = kv^2/2\gamma$$

Introducendo i valori calcolati nell'espressione generale del flusso $q = \frac{v}{\delta}$ possiamo ottenere il flusso corrispondente al distanziamento spaziale minimo nel caso di blocco mobile:

$$q = \frac{v}{\delta_{\min}} = \frac{v}{k \frac{v^2}{2\gamma} + L + f} \quad \text{con } L, f > 0 \text{ e } v \geq 0$$

Dove K è un coefficiente che tiene conto della parte variabile del franco di sicurezza f .

La funzione $q = q(v)$ è definita funzione/curva di deflusso $q-v$. Una rappresentazione grafica della curva di deflusso del blocco mobile, detta anche curva di Lehner, è la seguente:

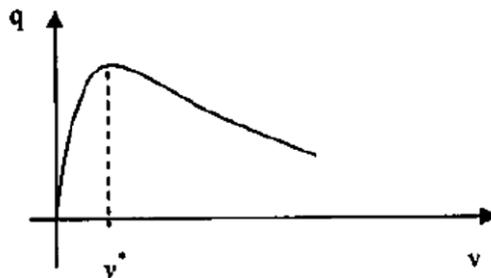


Fig 2.2.1-1 Curva di deflusso $q-v$ per blocco mobile (Curva di Lehner)

Dalla curva possiamo valutare l'andamento del flusso in funzione della velocità: per velocità basse il termine v^2 può essere trascurato rispetto a v e il flusso assume un andamento lineare con la velocità, rappresentato graficamente da una retta uscente dall'origine; per velocità elevate è invece il termine v a poter essere trascurato rispetto a v^2 e la curva assume un andamento iperbolico. Per velocità infinite il flusso è nullo (asintoto $q = 0$ per $v \rightarrow \infty$).

La curva ha un valore massimo in corrispondenza del valore di velocità v^* , definita *velocità critica*, che può essere ricavato annullando la derivata prima della funzione $q(v)$. Tale valore è pari a:

$$v^* = \sqrt{\frac{2\gamma(L+f)}{K}}$$

Si può notare che la velocità critica è funzione lineare di $\sqrt{\gamma}$ e di \sqrt{L} , a parità degli altri fattori.

Sostituendo tale valore nell'espressione della capacità teorica otteniamo:

$$C = \frac{v^*}{\delta_{min}} = \sqrt{\frac{\gamma}{2K(L+f)}}$$

In questo caso notiamo invece che la capacità è direttamente proporzionale a $\sqrt{\gamma}$ ma inversamente proporzionale a \sqrt{L} .

In altre parole, all'aumentare della decelerazione e quindi del sistema frenante del convoglio, la velocità critica e la capacità aumentano, secondo la funzione $\gamma = \sqrt{x}$; mentre all'aumentare della lunghezza del treno la velocità critica aumenta, secondo la funzione $\gamma = \sqrt{x}$, a discapito della capacità che diminuisce come $\gamma = 1/\sqrt{x}$.

(Ricordiamo che in questa trattazione stiamo valutando la capacità di una linea ferroviaria in termini di mezzi: la capacità mi esprime il numero massimo di treni che possono circolare, nell'unità di tempo, su un generico punto della linea. Il discorso sarebbe ben diverso se volessimo valutare la capacità in termini di passeggeri, ossia la *capacità nominale del sistema di trasporto*, pari al prodotto del numero dei treni transitanti nell'unità di tempo e del fattore medio di riempimento σ . In questo caso, ovviamente, all'aumentare della lunghezza dei treni corrisponde un aumento del numero di passeggeri trasportati dai singoli treni, e un aumento della capacità nominale: infatti la capacità diminuisce con \sqrt{L} ma la capienza aumenta linearmente con L .)

Dalle espressioni sopra descritte, possiamo notare come la capacità massima, nel caso di blocco mobile, non si ottenga mai ad alte velocità bensì per valori attorno ai 50-80 Km/h: all'aumentare della velocità prevale infatti l'aumento dello spazio necessario per la frenatura del convoglio (e quindi del termine al denominatore δ_{min}).

Di seguito riporto un esempio "pratico" delle variazioni dei valori di velocità critica e di capacità teorica, al variare dei parametri da cui dipendono (γ , L), nel caso di blocco mobile:

Tipologie di treni	Parametri cinetici	Velocità critica	Capacità teorica
Caso 1°: Metropolitana	$\gamma = 0.7 \text{ m/s}^2$ $L = 120 \text{ m}$ $f = 20 \text{ m}; K = 1.1$	$v^* = 48 \text{ km/h}$	$C = 172 \text{ treni/h}$ (1 ogni 21'')
Caso 2°: Treno metropolitano	$\gamma = 0.6 \text{ m/s}^2$ $L = 250 \text{ m}$ $f = 20 \text{ m}; K = 1.1$	$v^* = 62 \text{ km/h}$	$C = 114 \text{ treni/h}$ (1 ogni 31'')
Caso 3°: Treno passeggeri (AV/ non AV)	$\gamma = 0.5 \text{ m/s}^2$ $L = 400 \text{ m}$ $f = 20 \text{ m}; K = 1.1$	$v^* = 70 \text{ km/h}$	$C = 84 \text{ treni/h}$ (1 ogni 43'')
Caso 4°: Treno merci	$\gamma = 0.4 \text{ m/s}^2$ $L = 500 \text{ m}$ $f = 20 \text{ m}; K = 1.1$	$v^* = 70 \text{ km/h}$	$C = 67 \text{ treni/h}$ (1 ogni 54'')

Caso 5°: Treno merci lungo	$\gamma = 0.3 \text{ m/s}^2$ L = 800 m f = 20 m; K = 1.1	$v^* = 76 \text{ km/h}$	C = 46 treni/h (1 ogni 78 ^{''})
-------------------------------	----------------------------------------------------------------	-------------------------	----------------------------------------------

Tabella 6 – Esempi teorici di capacità e velocità critica

Nei primi tre casi la diminuzione della capacità teorica da 172 a 84 treni/h (riduzione del 51% rispetto al valore iniziale) è dovuto all'effetto combinato della riduzione della decelerazione e dell'aumento della lunghezza del treno. La velocità critica invece aumenta a seguito dell'aumento della lunghezza del treno che compensa ampiamente la diminuzione della decelerazione.

Tra il 3° e il 4° caso l'aumento di L e la riduzione di γ si compensano, senza provocare quindi alcuna variazione della velocità critica.

Se avessimo mantenuto invariata la lunghezza del treno (L = 120 m) la velocità critica sarebbe diminuita in seguito alla riduzione della decelerazione, mentre la capacità avrebbe sempre subito una riduzione, ma in modo più lieve, passando da 172 a 145 treni/h (riduzione del 16% anziché del 51%) nei primi tre casi.

Caso 1°:	$\gamma = 0.7 \text{ m/s}^2$ L = 120 m f = 20 m; K = 1.1	$v^* = 48 \text{ km/h}$	C = 172 treni/h (1 ogni 21 ^{''})
Caso 2°:	$\gamma = 0.6 \text{ m/s}^2$ L = 120 m f = 20 m; K = 1.1	$v^* = 44 \text{ km/h}$	C = 158 treni/h (1 ogni 23 ^{''})
Caso 3°:	$\gamma = 0.5 \text{ m/s}^2$ L = 120 m f = 20 m; K = 1.1	$v^* = 41 \text{ km/h}$	C = 145 treni/h (1 ogni 25 ^{''})

Tabella 7 – Esempi di capacità teorica al variare della decelerazione γ

Mantenendo, invece, costante la decelerazione ($\gamma = 0,7 \text{ m/s}^2$), la velocità critica sarebbe aumentata in seguito all'aumento della lunghezza del treno, e la capacità sarebbe sempre diminuita in modo più lieve rispetto alla tabella iniziale, passando da 172 a 99 treni/h (riduzione del 44% anziché del 51%)

Caso 1°:	$\gamma = 0.7 \text{ m/s}^2$ L = 120 m f = 20 m; K = 1.1	$v^* = 48 \text{ km/h}$	C = 172 treni/h (1 ogni 21 ^{''})
Caso 2°:	$\gamma = 0.7 \text{ m/s}^2$ L = 250 m f = 20 m; K = 1.1	$v^* = 66 \text{ km/h}$	C = 124 treni/h (1 ogni 29 ^{''})

Caso 3°:	$\gamma = 0.7 \text{ m/s}^2$ $L = 400 \text{ m}$ $f = 20 \text{ m}; K = 1.1$	$v^* = 83 \text{ km/h}$	$C = 99 \text{ treni/h}$ (1 ogni 36'')
----------	------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------	-------------------------------------------

Tabella 8 – Esempi di capacità teorica al variare della lunghezza dei treni L

Come abbiamo già visto, il blocco mobile è uno degli elementi innovativi introdotti dal sistema ERTMS/ETCS di livello 3 che però, attualmente, non è ancora stato realizzato. Tuttavia il suo studio risulta molto interessante, a prescindere delle sue applicazioni pratiche, dal momento che, come dimostreremo più avanti, la curva di Lehner costituisce il limite massimo teorico di ogni altra curva di deflusso q-v. Pertanto la conoscenza del blocco mobile costituisce un valido modello di riferimento anche per il blocco fisso.

2.2.2 CAPACITÀ TEORICA DEL BLOCCO FISSO

Nel caso del blocco fisso, come abbiamo già visto in precedenza, la linea è suddivisa in sezioni di lunghezza prefissata e il distanziamento minimo tra due treni successivi è funzione proprio di tale lunghezza. Il distanziamento minimo, nel caso di sezioni concatenate e segnali ad n aspetti, può essere espresso in forma generale (per i valori esatti, che dipendono dai sistemi di circolazione adottati, si rimanda al capitolo 1.4) come:

$$\delta_{min} = d(n,b) + L + f$$

Dove L è la lunghezza del treno

f è un franco di sicurezza (nei sistemi di blocco basati sui segnali luminosi f assume anche un significato legato alla visibilità del segnale stesso che può determinare un anticipo di frenatura da parte del personale di condotta)

n è il numero di aspetti del segnalamento: rosso (via impedita), verde (via libera) e n-2 gialli (avvisi di via impedita)

b è la lunghezza della sezione, in questo caso intesa come la distanza dal primo segnale giallo, incontrato dal treno che segue, al segnale rosso (mentre in precedenza con il termine lunghezza della sezione ($L_{sezione}$) indicavamo la distanza tra due segnali di prima categoria successivi. Nel caso di sezioni concatenate tale distanza era pari a 1350m o 1800m nel caso rispettivamente di linee convenzionali o ad alta velocità/alta capacità)

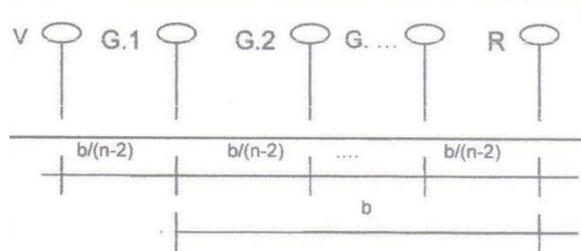


Fig 2.2.2-1 Lunghezza della sezione b

Se $n - 2$ sono gli aspetti del giallo, allora la distanza b sarà suddivisa in $n - 2$ sottosezioni ciascuna lunga $b/(n - 2)$

Riportiamo qualche esempio pratico al riguardo, considerando sezioni concatenate con distanza tra i segnali pari a 1350m:

- | | | |
|-----------------------------------------------------------------|---------|--------------|
| nel caso di blocco automatico a correnti fisse | $n = 3$ | $b = 1350$ m |
| nel caso di blocco automatico a correnti codificate, a 4 codici | $n = 4$ | $b = 2700$ m |
| nel caso di blocco automatico a correnti codificate, a 9 codici | $n = 6$ | $b = 5400$ m |

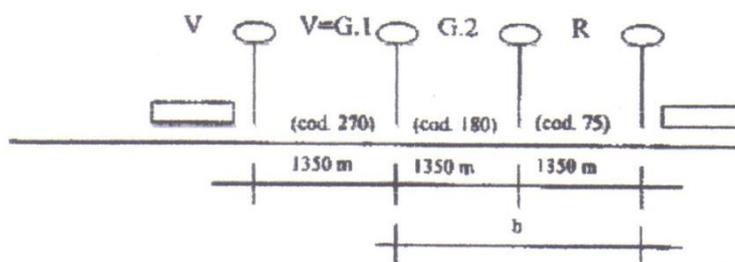


Fig 2.2.2-2 Esempio lunghezza della sezione b con blocco automatico a 4 codici

La distanza $d(n,b)$ esprime fisicamente il fatto che il treno che segue non deve rallentare la sua marcia a seguito di un segnale giallo, pertanto sarà funzione proprio del numero di aspetti dei segnali n e della lunghezza della sezione b .

In particolare d dovrà essere maggiore, o al limite uguale, alla lunghezza della sezione b , la quale a sua volta dovrà essere maggiore o uguale alla distanza di arresto del treno per ragioni di sicurezza, come già spiegato in precedenza: $d \geq b \geq S_{\text{arresto}}$

Affinchè il treno che segue veda sempre il verde, dovrà essere ad una distanza:

$$d = b + \frac{b}{n-2} = \frac{n-1}{n-2} b \geq b$$

Al limite, per $n \rightarrow \infty$ $d = b$, ossia la sezione “cuscinetto” posta a monte del primo giallo si riduce ad una distanza infinitesima: fisicamente è come se il verde davanti al treno coincidesse con il primo segnale giallo.

Inserendo il valore calcolato nella formula generale $q = \frac{v}{\delta}$ otteniamo che il valore del flusso, corrispondente al distanziamento minimo nel caso di blocco fisso a sezioni concatenate, è pari a:

$$q = \frac{v}{\delta_{min}} = \frac{v}{d(n,b)+L+f} = \frac{v}{\frac{n-1}{n-2}b+L+f} \quad \text{con } n \geq 3; b, L, f > 0; v \geq 0; b \geq (L+f)$$

La maggiore differenza col caso del blocco mobile è che la curva di deflusso è una funzione lineare della velocità, valida però fintantochè lo spazio di frenatura è minore della lunghezza della sezione b . Qualora ciò si verificasse ($S_{frenatura} = b$) si raggiungerebbe la capacità e quindi, per poter viaggiare a velocità superiori, si dovrebbe passare a un'altra classe di lunghezza b delle sezioni. Per questo motivo si ha una discontinuità nell'andamento del flusso

Graficamente la funzione di deflusso, fissata la lunghezza b , è rappresentata da una retta uscente dall'origine, con pendenza pari a $\frac{1}{\frac{n-1}{n-2}b+L+f}$ e massimo in corrispondenza della capacità $C(b)$.

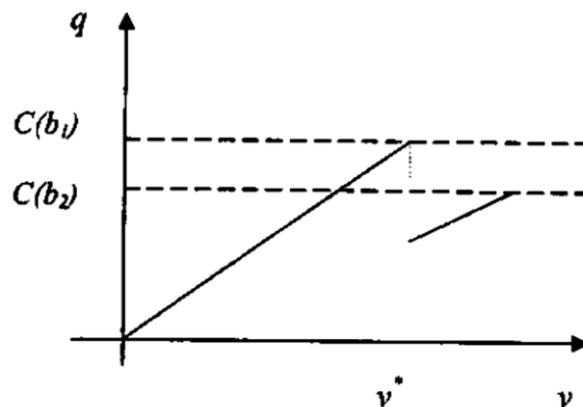


Fig 2.2.2-3 Curva di deflusso q-v nel caso di blocco fisso

Dal grafico risulta evidente la considerazione fatta sopra: all'aumentare della lunghezza della sezione ($b_2 > b_1$) si possono ottenere velocità di percorrenza maggiori, a discapito però della capacità ($C(b_2) < C(b_1)$).

La velocità critica v^* , ossia la velocità in corrispondenza della quale si ottiene il flusso massimo (capacità), può essere ottenuta eguagliando lo spazio di frenatura alla lunghezza b della sezione.

Consideriamo lo spazio di frenatura pari a $k \frac{v^2}{2\gamma}$ dove γ è la decelerazione del treno, supposta costante fino all'arresto, e k è un coefficiente di sicurezza. La velocità critica sarà pertanto pari a:

$$k \frac{v^2}{2\gamma} = b \rightarrow v^* = \sqrt{\frac{2\gamma b}{k}}$$

Inserendo tale valore nell'espressione della capacità otteniamo:

$$C = \frac{v^*}{\delta_{min}} = \frac{\sqrt{\frac{2\gamma b}{k}}}{\frac{n-1}{n-2} b + L + f}$$

(ovviamente, nel caso la velocità massima v_{max} consentita, dalle caratteristiche del convoglio o da quelle della linea, fosse inferiore a quella critica, si avrebbe $C = \frac{v_{max}}{\delta_{min}} = \frac{v_{max}}{\frac{n-1}{n-2} b + L + f}$).

La capacità, nel caso di blocco fisso a sezioni concatenate, è dunque funzione della lunghezza b della sezione e del numero di aspetti dei segnali n .

Non esiste alcuna coppia (b,n) che rappresenti un massimo o un minimo della funzione $C = C(b,n)$, ossia non esiste alcuna coppia che mi vada ad annullare le derivate prime parziali della funzione, rispetto alle due variabili. In particolare la derivata prima parziale rispetto ad n risulta positiva per qualsiasi valore di n ($\frac{\partial C(b,n)}{\partial n} > 0 \quad \forall n > 0$).

Fissando però una delle due variabili è possibile studiare l'andamento della capacità in funzione dell'altra variabile e determinarne il valore per cui ho la capacità massima:

- Fissando il parametro n , la funzione $C = C(b)$ può essere rappresentata graficamente dalla curva:

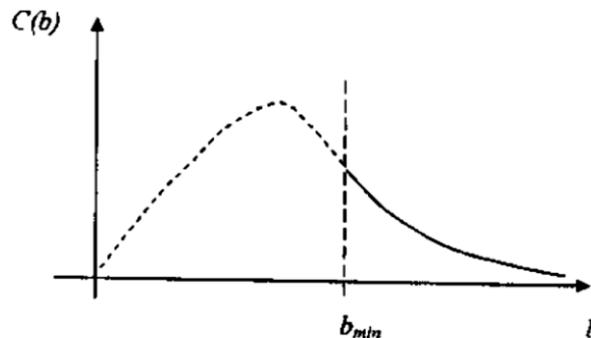


Fig 2.2.2-4 Rappresentazione grafica dell'andamento della capacità in funzione della lunghezza della sezione b , fissato il parametro n

Considerando però solamente i valori di $b \geq L + f$, per ovvie ragioni pratiche.

La curva presenta un massimo per $b = \frac{(n-2)(L+f)}{n-1}$ che vale $C(b) = \sqrt{\frac{n-2}{n-1}} \sqrt{\frac{\gamma}{2(L+f)k}}$ ma che non rientra nel dominio di validità della funzione, in quanto la frazione $\sqrt{\frac{n-2}{n-1}}$ è sempre < 1 per qualunque valore di n .

Per la parte che ha significato fisico si può invece notare come all'aumentare della lunghezza b della sezione diminuisce la capacità, a parità degli altri parametri.
 Per $b \rightarrow \infty$ $C(b) = 0$ (asintoto orizzontale)

- Fissando invece il parametro b la funzione di capacità riscritta in modo da evidenziare la dipendenza da n come $C(n) = \frac{n\sqrt{\frac{2\gamma b}{k}} - 2\sqrt{\frac{2\gamma b}{k}}}{n(b+L+f) - b - 2L - 2f}$, è rappresentata graficamente dalla curva:

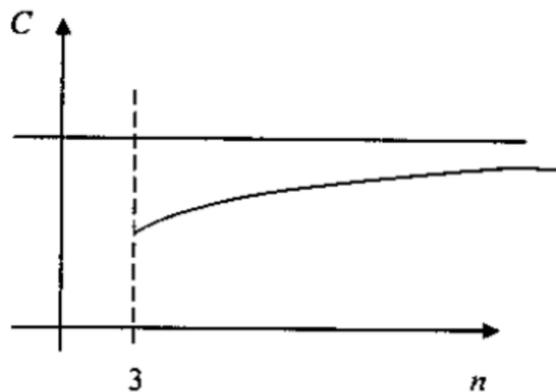


Fig 2.2.2-5 Rappresentazione grafica dell'andamento della capacità in funzione del numero di aspetti del segnalamento n , fissato il parametro b

Il cui dominio è costituito dall'intervallo $n \geq 3$ con $n \neq \frac{b+2(L+f)}{b+L+f}$, quest'ultima condizione sempre verificata considerando che b dev'essere maggiore di $(L+f)$ e che L è sempre positivo.

Dal grafico risulta evidente come all'aumentare degli aspetti n aumenti anche la capacità

$C(n)$. Al limite $n \rightarrow \infty$ $C(n) = \frac{\sqrt{\frac{2\gamma b}{k}}}{b+L+f}$ (asintoto orizzontale), ossia il coefficiente di b è uguale ad 1 (c'era da aspettarselo dal momento che per $n \rightarrow \infty$ è come avere un blocco mobile nel quale, come sappiamo, il distanziamento minimo è pari a $b(= S_{frenatura}) + L + f$).

Per $n = 3$ si ottiene invece $C(n) = \frac{\sqrt{\frac{2\gamma b}{k}}}{2b+L+f}$.

Riporto ora alcuni esempi teorici delle considerazioni fatte sin ora sulla capacità del blocco fisso con sezioni concatenate:

Lunghezza della sezione b	Numero di aspetti del segnalamento n	Velocità critica v^*	Capacità teorica C	Riduzione della capacità in funzione dell'aumento di b
$b = 450\text{m}$	$n = 3$	$v^* = 73 \text{ km/h}$	$C = 62 \text{ treni/h}$ (1 ogni 58 sec)	
$b = 900\text{m}$	$n = 3$	$v^* = 103 \text{ km/h}$	$C = 45 \text{ treni/h}$ (1 ogni 79 sec)	- 27% rispetto a $b = 450\text{m}$
$b = 1800\text{m}$	$n = 3$	$v^* = 145 \text{ km/h}$	$C = 35 \text{ treni/h}$ (1 ogni 1 ^l e 43 sec)	- 44% rispetto a $b = 450\text{m}$
$b = 5000\text{m}$	$n = 3$	$v^* = 243 \text{ km/h}$	$C = 23 \text{ treni/h}$ (1 ogni 2 ^l e 35 sec)	- 63% rispetto a $b = 450\text{m}$

Tabella 9 – Esempi di capacità teorica al variare della lunghezza delle sezioni b , fissato il numero di aspetti del segnalamento n

Lunghezza della sezione b	Numero di aspetti del segnalamento n	Velocità critica v^*	Capacità teorica C	Incremento della capacità in funzione dell'aumento di n
$b = 5000\text{m}$	$n = 3$	$v^* = 243 \text{ km/h}$	$C = 23 \text{ treni/h}$ (1 ogni 2 ^l e 35 sec)	
$b = 5000\text{m}$	$n = 4$	$v^* = 243 \text{ km/h}$	$C = 30 \text{ treni/h}$ (1 ogni 1 ^l e 58 sec)	+30% rispetto a $n = 3$
$b = 5000\text{m}$	$n = 5$	$v^* = 243 \text{ km/h}$	$C = 34 \text{ treni/h}$ (1 ogni 1 ^l e 45 sec)	+48% rispetto a $n = 3$
$b = 5000\text{m}$	$n = 6$	$v^* = 243 \text{ km/h}$	$C = 36 \text{ treni/h}$ (1 ogni 1 ^l e 40 sec)	+56% rispetto a $n = 3$

Tabella 10 – Esempi di capacità teorica al variare del numero di aspetti del segnalamento n , fissata la lunghezza delle sezioni b

I valori riportati nella tabella sono stati calcolati facendo riferimento ai seguenti parametri:

- Lunghezza del treno $L = 250\text{m}$ nel caso $b = 450\text{m}$
 $L = 450\text{m}$ in tutti gli altri casi
- Decelerazione $\gamma = 0.5\text{m/s}^2$
- Franco di sicurezza $f = 20\text{m}$
- Coefficiente di sicurezza $K = 1.1$

Dalla prima tabella è facile notare come all'aumentare della lunghezza delle sezioni aumenti la velocità critica e diminuisca la capacità; la seconda tabella mostra, invece, come aumenti la capacità in seguito all'aumento del numero degli aspetti del segnalamento, mentre la velocità critica rimane invariata (è indipendente da n). L'andamento della capacità e della velocità critica rispetto alle caratteristiche b e n non è lineare, come già indicato dalle formule e dalle curve della capacità prima descritte.

Caso particolare: sezioni isolate

Nel caso di sezioni isolate abbiamo visto che il distanziamento minimo tra due treni che si susseguono è pari a:

$$\delta_{\min} = (X + \beta) + L + f$$

dove X è la lunghezza della sezione di blocco (distanza tra due segnali di prima categoria successivi) e β la distanza tra il segnale di avviso e il corrispondente segnale di prima categoria.

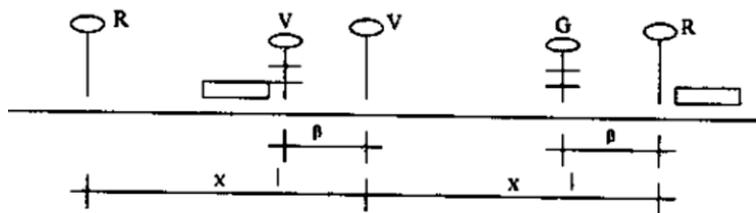


Fig 2.2.2-6 Distanziamento minimo nel caso di sezioni isolate

Tuttavia è possibile anche schematizzare il blocco con avviso isolato come un blocco con segnali "virtuali" concatenati, in cui la lunghezza b sia uguale a β .

È sufficiente infatti calcolare un numero di aspetti virtuali, che indicheremo con n^* , imponendo l'uguaglianza dell'espressione del termine δ_{\min} del blocco con avviso isolato e del blocco concatenato.

Dalle 2 equazioni

$$X + \beta + L + f = \frac{n^* - 1}{n^* - 2} b + L + f \quad \text{e} \quad b = \beta$$

si ricava

$$n^* = \frac{b + 2X}{X}$$

che sostituito nell'espressione del flusso mi da

$$q = \frac{v}{\frac{n^*-1}{n^*-2}b + X + f}$$

Come visto in precedenza ci ricaviamo la velocità critica

$$v^* = \sqrt{\frac{2\gamma b}{k}}$$

E possiamo quindi calcolarci la capacità

$$C = \frac{\sqrt{\frac{2\gamma b}{k}}}{\frac{n^*-1}{n^*-2}b + X + f}$$

2.2.3 CONFRONTO TRA BLOCCO FISSO E BLOCCO MOBILE

La curva di deflusso del blocco mobile (la curva di Lehner) rappresenta il limite massimo teorico dell'involuppo dei massimi delle curve di deflusso del blocco fisso. Le rette del grafico q-v del blocco fisso (descritte in figura 2.2.2-3), ottenute fissando il valore di b, saranno pertanto sempre contenute all'interno della curva di Lehner. In particolare ponendo la lunghezza delle sezioni pari alla distanza di arresto e considerando un numero di aspetti dei segnali che tende all'infinito (ossia minimizzo b e massimizzo n, ottenendo così la capacità massima) la retta q-v del blocco fisso raggiungerà il suo massimo proprio in corrispondenza della curva di Lehner.

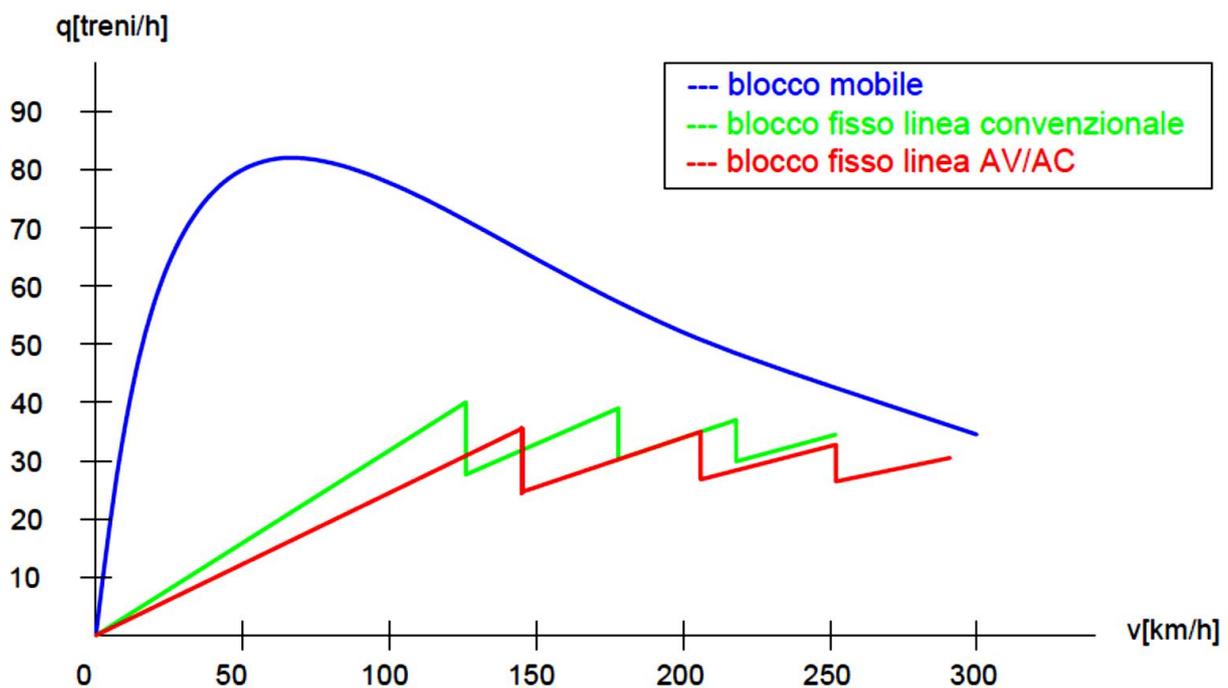


Fig 2.2.3-1 Confronto tra le curve di deflusso del blocco mobile e del blocco fisso

Tale affermazione può essere facilmente dimostrata confrontando l'espressione analitica del flusso, in funzione della velocità, nel caso del blocco mobile $q = \frac{v}{k \frac{v^2}{2\gamma} + L + f}$ con l'espressione

$C(n) = \frac{v}{\frac{n-1}{n-2} b + L + f}$ (che mi esprime l'involuppo dei massimi delle curve di deflusso del blocco fisso, fissata b), ponendo la lunghezza delle sezioni di blocco pari allo spazio di frenatura $k \frac{v^2}{2\gamma}$.

Dovremo quindi dimostrare che è sempre valida la seguente disequazione:

$$\frac{v}{k \frac{v^2}{2\gamma} + L + f} \geq \frac{v}{\frac{n-1}{n-2} \frac{Kv^2}{2\gamma} + L + f}$$

Riscrivendola si ottiene

$$\frac{n-1}{n-2} \frac{Kv^2}{2\gamma} + L + f \geq k \frac{v^2}{2\gamma} + L + f$$

Ossia

$$\frac{n-1}{n-2} \geq 1$$

Espressione sempre verificata per valori di n finiti e positivi, con $n \geq 3$

Al limite per $n \rightarrow \infty$ vale il segno di uguaglianza: la capacità del blocco fisso con infiniti aspetti (e b pari alla distanza di arresto) coincide con il valore del flusso del blocco mobile in corrispondenza di una data velocità.

Possiamo quindi affermare che l'utilizzo del blocco mobile, rispetto a quello fisso, porterebbe a massimizzare la capacità della linea, sfruttando il distanziamento minimo possibile, calcolato istante per istante. Come si può vedere dal grafico la differenza della capacità tra i due blocchi è molto elevata per velocità attorno ai 50-80 km/h, in prossimità delle quali la capacità del blocco mobile è massima. Tale differenza diminuisce all'aumentare della velocità.

2.3 CAPACITÀ REALE E METODI DI CALCOLO

Nel caso del blocco mobile, dal momento che questo non ha ancora trovato alcuna realizzazione pratica, la capacità può essere studiata solamente da un punto di vista prettamente teorico, come abbiamo visto nei capitoli precedenti.

Nello studio del blocco fisso sarà invece opportuno fare una distinzione tra i concetti di capacità teorica e di capacità reale: i valori calcolati nei precedenti paragrafi sono infatti valori ideali che si distaccano dai valori reali, riscontrati nella pratica. Ciò è dovuto al fatto che la capacità teorica è

calcolata sulla base di diverse ipotesi semplificative, trascurando alcuni aspetti che hanno un'influenza in ambito pratico. Per ottenere i valori reali della capacità bisogna, infatti, tenere conto di diverse caratteristiche e variabili:

- Sistemi di circolazione e sistemi di segnalamento adottati, da cui dipendono i distanziamenti minimi, i tempi di percorrenza e quelli di intervento delle apparecchiature (azionamenti e riasseti);
- L'eterotachicità e la disomogeneità dei treni: i treni che circolano su una linea possono presentare caratteristiche diverse, in particolare per quanto riguarda la lunghezza del rotabile e il sistema frenante, e possono viaggiare a velocità differenti;
- Legge di successione dei treni, cioè la distribuzione degli intervalli di tempo tra gli arrivi;
- Numero e distanze reciproche degli impianti di linea;
- Parametri di regolarità previsti: il calcolo della capacità è strettamente legato alla regolarità dell'esercizio, è infatti intuitivo come il grado di saturazione di una linea ferroviaria comporti irregolarità d'esercizio, che si traducono in ritardi per i treni.
- Periodo di riferimento, sia per la sua estensione (potenzialità oraria, giornaliera, ecc...) sia per la sua collocazione all'interno della giornata (periodo di punta o di morbida, mattutino o pomeridiano);

Infine è opportuno tener presente che per calcolare il valore complessivo della capacità di una rete ferroviaria non si può prescindere dal valore di capacità dei nodi: questo dipende dalla topologia e dalle specifiche tecnico funzionali dei nodi stessi (numero e organizzazione dei binari, tempi e modalità di formazione e liberazione degli itinerari, velocità massima dei binari di corsa, servizi del treno in caso di sosta, ecc...) ma viene calcolato con modelli differenti da quelli utilizzati per le linee che andrò a trattare.

Per poter calcolare il valore reale della capacità, tenendo conto delle variabili sopra descritte, del loro peso e delle leggi che le regolano, sono stati elaborati una serie di metodi, che possono essere raggruppati in tre tipologie:

- Metodi analitici che adottano formule di tipo deterministico, altrimenti definiti statici.
- Metodi analitici che adottano formule di tipo probabilistico, introducendo parametri calcolati con criteri statistici e considerando la probabilità del verificarsi di determinate condizioni di regolarità dei servizi. Tra questi rientrano ad esempio il metodo UIC e il metodo DB;
- Metodi analogici che si avvalgono di procedure di simulazione più o meno complesse.

2.3.1 MODELLI ANALITICI DETERMINISTICI

Un esempio di modello statico è quello che veniva utilizzato proprio dalle FS, fino alla fine degli anni '90, basato su varie formulazioni comunque riconducibili all'espressione:

$$P = \left(N + \frac{T - t - Nv(Pv+i) - Nm(Pm+i)}{Pm+i} \right) * K$$

nella quale:

- P è la potenzialità espressa in treni nel periodo di riferimento T (nel caso di linee a doppio binario si riferisce a ciascun senso di marcia) calcolata sulla sezione critica (sezione che presenta il maggior tempo complessivo di occupazione);
- $N = Nv + Nm$ è il numero totale di treni ordinari previsti in orario;
- T è il periodo di riferimento espresso in minuti;
- t è il periodo di sospensione giornaliera del servizio per manutenzione o altra causa;
- Nv è il numero di treni viaggiatori ordinari previsti in orario;
- Nm è il numero dei treni merci previsti in orario;
- Pv è il tempo medio di percorrenza della sezione critica da parte dei treni viaggiatori calcolato in minuti;
- Pm è il tempo medio di percorrenza della sezione critica da parte dei treni merci calcolato in minuti;
- i è il tempo di riassetto (tempo morto) delle apparecchiature di segnalamento;
- K è un coefficiente di riduzione (compreso fra 0,6 e 0,8) che deve tenere conto delle particolari condizioni di esercizio e dell'attrezzatura tecnica della linea, nonché della possibilità di ricevimento nelle stazioni di estremità.

La formula, come altre analoghe di tipo deterministico, può fornire solo valori di prima approssimazione, in quanto:

- i tempi di percorrenza risultano genericamente riferiti ai treni viaggiatori e merci senza ulteriore specificazione;
- il parametro i ed il coefficiente K sono puramente qualitativi ed in particolare il secondo moltiplica anche il numero N di treni che attualmente già impegnano la linea, mentre sarebbe più correttamente da riferirsi alle sole circolazioni residue;

- il termine aggiuntivo rispetto a N può assumere anche valori negativi, ma in questo caso la formula è da considerarsi inapplicabile (potenzialità inferiore al numero di treni attualmente già circolanti);
- non è possibile in nessun modo tenere conto dei periodi di punta, nei quali la circolazione risulta più congestionata, evidentemente a discapito della regolarità complessiva.

2.3.2 MODELLI ANALITICI PROBABILISTICI: IL METODO UIC

Il metodo proposto nel 1978 dall'UIC (Union Internationale des Chemins de fer) e descritto nella Fiche 405-1 R, risponde ai seguenti requisiti posti in sede di progettazione:

- semplicità di impiego;
- necessità di tenere conto delle circolazioni preesistenti e dei relativi requisiti di qualità;
- necessità di tenere conto delle caratteristiche infrastrutturali e tecnologiche delle linee;
- utilizzabilità anche in fase di progettazione delle infrastrutture.

Con questo metodo si assimila la sezione di linea ad un sistema a coda, come avviene ad esempio nel caso di un'intersezione stradale: in questo caso il servizio richiesto è l'accesso all'intersezione, nel caso ferroviario è l'accesso alla sezione di linea.

Ovviamente se i tempi di servizio, ossia i tempi necessari per accedere alla sezione, sono, per un certo periodo di tempo, superiori ai tempi di arrivo (tra due arrivi successivi) allora si genera una coda, con i conseguenti ritardi dovuti all'irregolarità dell'esercizio.

Un parametro fondamentale per determinare la lunghezza media della coda che viene a formarsi, che corrisponde al numero di treni che subiscono una perturbazione della marcia, è l'intensità di traffico

$$\Psi = \frac{T_{min}}{b}$$

Dove T_{min} rappresenta il tempo medio di servizio: esso è pari al tempo che un treno deve aspettare per poter accedere alla sezione di linea affinché sia mantenuta la distanza di sicurezza rispetto al treno che lo precede, oppure al tempo che deve attendere per eventuali precedenza dovuti alla presenza di incroci sulla sezione di linea; mentre b rappresenta il tempo medio fra due arrivi successivi. Consideriamo i valori medi dal momento che sia il tempo di servizio sia il tempo tra due arrivi successivi sono variabili aleatorie.

Numero medio utenti in coda

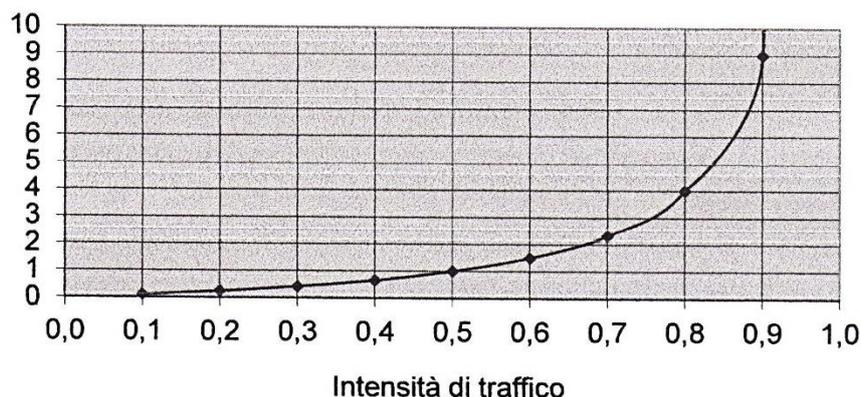


Fig 2.3.2-1 Rapporto tra l'intensità di traffico e il numero medio di utenti (treni) in coda

Per quanto detto in precedenza è necessario che $\Psi < 1$, in caso contrario, infatti, il sistema non raggiunge le condizioni di stazionarietà e la lunghezza della coda, all'aumentare del tempo, tende all'infinito.

In questo caso possiamo dunque esprimere l'intensità di traffico come

$$\Psi = \frac{T_{min}}{T_{min} + T_r}$$

dove T_r è il tempo di attesa.

Un'estesa campagna di test svolta in sede UIC ha portato a identificare dei valori limiti di Ψ al di sotto dei quali la coda che si forma, e il ritardo che comporta, possono essere considerati trascurabili. Tali valori sono:

- $\Psi = 0,6$ (corrispondente a 1,5 utenti/treni in attesa) valore limite valido per un periodo illimitato corrispondente al funzionamento a regime del sistema (intera giornata), da cui deriva la condizione $T_r \geq 0,67 T_{min}$;
- $\Psi = 0,75$ (corrispondente a 3,1 utenti/treni in attesa) valore limite valido per brevi periodi di tempo corrispondenti al funzionamento nei periodi di punta, da cui deriva la condizione $T_r \geq 0,33 T_{min}$.

Con il metodo UIC il tempo medio di servizio T_{min} viene calcolato sfruttando due matrici di pari dimensione:

- La matrice S, relativa alla quantità dei casi di successione fra treni, ripartiti tra classi di tempi di percorrenza (essendo la linea eterotachica i treni vengono suddivisi in gruppi/classi in base alla loro velocità e quindi al tempo di percorrenza). La somma degli elementi della matrice sarà ovviamente pari al numero totale di treni N che circolano sulla linea meno uno;
- La matrice T, relativa ai tempi di occupazione nei diversi casi di successione.

La matrice prodotto $S \times O$ fornisce i tempi di occupazione complessivi per ogni caso e la somma dei suoi elementi rappresenta il tempo totale di occupazione (T_{ot}) dell'infrastruttura.

Si può quindi calcolare l'intervallo medio di distanziamento minimo fra i treni come:

$$T_{min} = \frac{T_{ot}}{N-1}$$

che rappresenterà quindi il valore medio dei tempi di distanziamento ponderato con i casi di successione.

L'espressione generale per il calcolo della potenzialità, secondo il metodo UIC, sarà dunque:

$$C = \frac{T}{T_{min} + T_r + T_{zu}}$$

Dove T è il tempo di riferimento e T_{zu} è il tempo supplementare che tiene conto del numero delle sezioni sul tratto di linea in esame.

Il calcolo del tempo supplementare si basa anch'esso su risultanze sperimentali e permette di portare in conto l'influenza dell'insieme della linea. I risultati dei suddetti test hanno suggerito di adottare il valore:

$$T_{zu} = 0,25 a$$

dove la quantità a rappresenta il numero dei posti di blocco intermedi della tratta determinante. Il tempo supplementare così espresso serve in particolare a tenere conto del fatto che l'aumento di potenzialità sulla sezione determinante, ottenibile a seguito della sua suddivisione in sezioni di blocco, è meno che proporzionale alla riduzione dei tempi di percorrenza.

2.3.3 MODELLI ANALITICI PROBABILISTICI: IL METODO DB

Le ferrovie federali tedesche (DB) hanno messo a punto un metodo per la quantificazione della potenzialità delle linee, anch'esso di tipo probabilistico e basato su principi analoghi a quelli del metodo UIC, seppure con alcune significative peculiarità.

L'espressione della potenzialità riferita all'intera giornata è in questo caso:

$$C = \frac{T}{T_{min} (1+q)}$$

Per il calcolo di t_{min} si considerano in questo caso due categorie di treni, veloci (v) e lenti (l), e si utilizza l'espressione:

$$T_{min} = \frac{Tvv Nv^2 + (Tvl + Tlv)Nv Nl + Tl Nl^2}{(Nv + Nl)^2}$$

nella quale si ha:

- N_v e N_l sono i numeri di treni veloci e lenti circolanti sulla linea;
- T_{vv} , T_{vl} , T_{lv} e T_{ll} sono i valori medi degli intervalli di tempo minimi fra le diverse successioni possibili delle due categorie di treni considerate.

Le differenze rispetto al metodo UIC sono riassunte nel significato del termine q , che esprime il cosiddetto *tempo cuscinetto*, che serve a tenere conto della situazione d'orario preesistente o di ipotesi ad essa relative, ma soprattutto dei parametri di regolarità dell'esercizio che si intende imporre.

Per la valutazione di q è necessario dapprima determinare il grado di fluidità H definito mediante l'espressione:

$$H = \frac{Pf}{1440 * (We - \frac{We^2}{2})}$$

nella quale:

- P_f è il totale giornaliero di ritardi che si tollera vengano generati nella sezione di riferimento in conseguenza della presentazione dei treni in ritardo rispetto al programma d'esercizio; tale valore numerico si traduce in un livello di regolarità offerto, che le ferrovie tedesche sono solite porre pari a 200 minuti/giorno, e che, in linea di principio, deve essere scelto in funzione delle caratteristiche specifiche della linea e dei servizi che su di essa si svolgono;
- W_e è la probabilità di arrivo di treni in ritardo alla sezione di riferimento; essa è pari al rapporto fra il numero di treni giunto in ritardo ed il totale dei treni circolanti nel periodo T ; evidentemente nel caso il metodo venga utilizzato per linee in fase di progettazione tale valore dovrà essere ipotizzato in analogia a linee di caratteristiche assimilabili.

In una seconda fase del calcolo si determina il fattore di trasferimento U espresso dalla:

$$U = \frac{T_{min}}{P_m}$$

nella quale P_m è il ritardo anteriore medio, cioè la media per treno dei ritardi in arrivo osservati nel periodo T , per il quale, per le situazioni di progetto, valgono le medesime considerazioni fatte per W_e .

Per procedere al calcolo è ancora necessario conoscere la probabilità di apparizione dei casi di successione di treni della stessa tipologia W_g , che si ottiene dall'orario, nel caso in cui se ne sia in possesso, oppure dall'espressione:

$$W_g = \frac{T_{vv} N_v^2 + T_{ll} N_l^2}{(T_{vl} + T_{lv}) N_v N_l}$$

Il complesso legame che intercorre tra le grandezze H , U e W_g può risolversi, ai fini pratici, nell'impiego di abachi del tipo qui sotto riportato, dal quale si ottiene direttamente il valore di q a partire dai valori delle suddette grandezze.

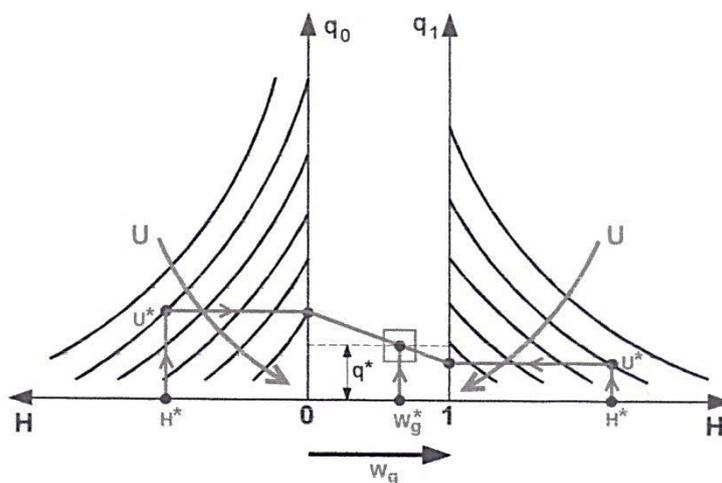


Fig 2.3.3-1 Abaco per la determinazione del tempo cuscinetto q

2.3.4 CONFRONTO TRA I METODI ANALITICI

I metodi di tipo probabilistico (UIC e DB) risultano certamente più attendibili rispetto a quelli deterministici che risultano più empirici ed approssimativi, meno flessibili rispetto alle possibili variazioni delle caratteristiche delle linee e quindi applicabili a più ristrette casistiche infrastrutturali e d'esercizio.

Di contro il limite dei metodi probabilistici emerge quando vi sono forti variazioni fra le intensità del traffico, ma soprattutto quando la distribuzione dei tempi di percorrenza fra le diverse tipologie di treni è molto ampia.

Tuttavia i metodi probabilistici hanno il vantaggio di poter essere utilizzati anche per verificare la potenzialità di una infrastruttura in progetto o in potenziamento.

Infatti, supponendo di disporre delle necessarie ipotesi sul traffico destinato ad impegnare un'infrastruttura in progetto, è possibile calcolare in via teorica il valore di T_{\min} come media ponderata di tutti i possibili casi di successione fra le tipologie di treni.

Il valore così ottenuto corrisponde alla potenzialità minima, cioè quella relativa ad una successione di treni governata dall'ipotesi di assoluta casualità (legge degli arrivi poissoniana).

Entrambi i metodi non prescindono, tuttavia, dall'applicazione ad una sezione di riferimento caratterizzata dal massimo tempo di percorrenza, che rappresenta di fatto il collo di bottiglia rispetto alla circolazione in linea, il che risulta in contrasto con la concezione tipicamente modulare delle linee ferroviarie di moderna concezione.

Scendendo in maggior dettaglio il metodo DB si differenzia per quanto concerne la correlazione con la regolarità dell'esercizio, che, a parità di ogni altra condizione, fa sì che i valori di potenzialità ottenuti possano essere diversi, talora sensibilmente, rispetto a quelli determinabili con il metodo UIC.

Inoltre la procedura prevista dal metodo DB risulta sensibilmente più articolata, trasparente e riproducibile rispetto a quella UIC basata su algoritmi sintetici e compatti quali quelli propri della teoria delle file di attesa.

A titolo esemplificativo si cita l'applicazione comparata dei tre metodi alla linea tedesca a doppio binario Würzburg – Hannover, caratterizzata da velocità massima di 250 km/h e con posti di precedenza intervallati ogni 20 km, per la quale, con una composizione del traffico di circa 140 treni/giorno, si ottengono i seguenti valori di potenzialità:

- metodo statico (FS tradizionale): 198÷264 treni/giorno;
- metodo UIC: 152 treni/giorno;
- metodo DB: 172 treni/giorno.

2.3.5 MODELLI ANALOGICI DI SIMULAZIONE

Un approccio sostanzialmente diverso rispetto ai metodi esposti è quello analogico, che tende a simulare lo svolgimento della circolazione sulle linee a partire dall'evento passaggio del treno, il quale risulta concatenato con una serie di successivi eventi, fra i quali, in particolare, le occupazioni dei binari e quindi delle sezioni di blocco.

Indipendentemente dall'approccio informatico al problema le caratteristiche descrittive della circolazione devono essere riassunte in una serie di elementi di base (input), che verranno utilizzati dal programma di calcolo, fra i quali rientrano senz'altro le seguenti tipologie di dati:

- caratteristiche fisiche e funzionali delle linee e degli impianti;
- prestazioni dinamiche e caratteristiche dimensionali del materiale rotabile;
- criteri adottati per la regolazione della marcia dei treni nel rispetto della logica di sicurezza.

Risulta evidentemente opportuno che i suddetti dati vengano forniti ed immagazzinati in maniera tale da semplificare al massimo le procedure per il loro aggiornamento e minimizzare quindi i tempi necessari ad ottenere i risultati.

Di norma i dati di maggior dettaglio che si possono ottenere dal processo di simulazione sono rappresentati dalle cosiddette storie treno, descrizione degli eventi che si succedono nel procedere di un treno lungo una linea, da tradursi in eventuali elaborati grafici (ad esempio grafici orario) ed indicatori maggiormente sintetici e significativi rispetto agli scopi (ad esempio ritardi variamente aggregati e mediati).

Nello sviluppo del processo di simulazione le maggiori difficoltà operative si incontrano per la stretta correlazione esistente fra parametri costruttivi ed operativi da una parte e la rappresentazione sistematica di una grande quantità di treni contemporaneamente circolanti dall'altra, con complesse influenze reciproche, spesso non esprimibili attraverso un'esplicita espressione analitica.

Nella maggioranza dei casi si procede quindi in termini di modelli astratti, nei quali si svolgono processi dinamici con avvenimenti discontinui (ingressi ed uscite dei treni dalle singole unità spaziali e temporali), secondo un approccio che viene spesso identificato con il termine di simulazione asincrona.

In questo schema le grandezze determinanti vengono integrate tra loro secondo il principio delle scatole di montaggio, per cui risulta superata la necessità di esplicitare le loro relazioni funzionali in termini analitici.

D'altro canto la possibilità di aggiornare con continuità i singoli parametri, non disgiunta dalla rapidità con la quale l'elaboratore consente di verificare le conseguenze delle variazioni di detti parametri, consente di svolgere al meglio le analisi di sensibilità degli impianti esistenti o in progetto alla variazione di standard impiantistici o d'esercizio.

Un esempio esplicito del concetto di simulazione asincrona si ha quando il treno, avendo raggiunto la velocità massima consentita dalla linea, supera tutta la tratta che segue percorsa a velocità costante tornando ad un'analisi passo dopo passo quando si vengono a produrre situazioni di avvicinamento fra le tracce orarie, ossia quando il treno inseguitore rischia di essere ritardato nella successiva percorrenza.

Per la realizzazione pratica dei modelli di simulazione sono state sviluppate ed applicate numerosissime tecniche, delle quali in prima approssimazione è possibile identificare il campo di applicazione ottimale (l'intero processo di circolazione o parti di esso) ed i relativi vantaggi e svantaggi nella tabella qui riportata:

Tecniche	Campi di applicazione ottimali	Vantaggi	Svantaggi	Modelli (esempi)
Teoria dei grafi	<ul style="list-style-type: none"> • Topologia infrastruttura 	<ul style="list-style-type: none"> • Trasparenza • Rappresentabilità della topologia • riproducibilità 	<ul style="list-style-type: none"> • Staticità • Limitata chiarezza delle reazioni 	FAKTUS PROLOP SIMU
Retri di Petri	<ul style="list-style-type: none"> • Topologia infrastruttura • Controllo esercizio 	<ul style="list-style-type: none"> • Sintesi fra teoria dei grafi e dinamiche discrete • Struttura gerarchica 	<ul style="list-style-type: none"> • Assenza di dinamica continua 	DISPOS SABINE
Linguaggi di programmazione	<ul style="list-style-type: none"> • Controllo esercizio • Programmazione esercizio 	<ul style="list-style-type: none"> • Flessibilità • Strutturazione ad oggetti • Semplicità di 	<ul style="list-style-type: none"> • Limitata possibilità di analisi • Rappresentazione discreta del 	FAKTUS OPENTRACK RWS SIMU

	<ul style="list-style-type: none"> • Topologia infrastruttura 	esecuzione	processo	SITRAF/S TRANSIT
Formalismi descrittivi	<ul style="list-style-type: none"> • Tecnologie di sicurezza 	<ul style="list-style-type: none"> • Dimostrabilità • Astrazione 	<ul style="list-style-type: none"> • Cospicua necessità di modellazione • Scarsa flessibilità 	HOL VDM
Comparazioni differenziali (analisi degli elementi finiti)	<ul style="list-style-type: none"> • Dinamica moto • Dinamica veicolo 	<ul style="list-style-type: none"> • Rappresentabilità del processo fisico 	<ul style="list-style-type: none"> • Difficoltà di rappresentazione delle tecnologie di sicurezza • Rappresentazione discreta del processo 	Vari e numerosi
Processi analitici (sequenze di algoritmi)	<ul style="list-style-type: none"> • Controllo esercizio • Programmazione esercizio • Potenzialità infrastrutture 	<ul style="list-style-type: none"> • Astrazione • Semplicità di formulazione delle reazioni 	<ul style="list-style-type: none"> • Scarsa rappresentabilità di dati concreti • Genericità dei risultati • Impossibilità di rappresentazione delle logiche di sicurezza 	PROLOP STRELE

Tabella 11 – Esempi di modelli di simulazione con le relative caratteristiche

2.4 COEFFICIENTI DI RITARDO D E DI STABILITÀ X

Oltre a quelli precedentemente descritti, esiste un altro metodo che permette di calcolare la capacità reale di una linea, partendo dal valore teorico “corretto” attraverso due coefficienti: il coefficiente di ritardo D e il coefficiente di stabilità X.

Il coefficiente di ritardo specifico D esprime *la quantità di tempo perduta da un generico convoglio nel percorrere la lunghezza unitaria di linea, per la presenza di cause ritardanti e/o fermate previste in orario*. Esso rappresenta un'estensione del coefficiente introdotto da Corriere nel 1982, che teneva, però, conto solamente delle cause ritardanti accidentali e non delle fermate di orario.

Analiticamente il coefficiente può essere espresso dunque come somma di due contributi:

$$D = D_0 + D_{\text{fermata}}$$

Dove D_0 è il ritardo dovuto a cause accidentali, mentre D_{fermata} è il ritardo dovuto alle fermate previste. Quest'ultimo generalmente dev'essere considerato applicato a tutti i treni del deflusso: infatti, anche se non tutti i treni hanno in orario delle fermate intermedie, l'arresto di un convoglio

induce una perturbazione ai treni che seguono (alla minima distanza) sia durante la fase di decelerazione in ingresso nella stazione sia, soprattutto, durante la fase di reimmissione nel flusso.

Il coefficiente D può essere valutato in due modi:

- Attraverso un'analisi diretta, andando a misurare i ritardi effettivamente registrati sulla linea, aggiungendo gli eventuali perditempi dovuti alle fermate d'orario. Affinchè il valore sia realistico le misurazioni devono essere effettuate in condizioni di linea "carica": infatti nel caso di linea poco trafficata, e quindi con bassi ritardi, il coefficiente non darebbe informazioni accettabili circa il comportamento della stessa in condizioni di saturazione. Per questo motivo tale metodo è più adatto al caso di linee della Rete fondamentale piuttosto che a quello di linee secondarie;
- Attraverso un'analisi indiretta, nel caso più generale, ossia attraverso un'idonea analisi statistica dei dati di ritardo di altre linee e/o di altre situazioni di traffico, compatibili con quella in esame.

Determinato il valore di D, andremo dunque a correggere la velocità inserita nell'espressione della funzione di deflusso q-v, introducendo la velocità effettiva

$$v_e = \frac{v}{1+Dv}$$

La velocità critica pertanto non sarà più uguale a $\sqrt{\frac{2\gamma b}{k}}$, valore utilizzato per calcolare la capacità teorica, bensì a

$$v^* = \frac{\sqrt{\frac{2\gamma b}{k}}}{1+D\sqrt{\frac{2\gamma b}{k}}}$$

Da cui

$$C = \frac{\frac{\sqrt{\frac{2\gamma b}{k}}}{1+D\sqrt{\frac{2\gamma b}{k}}}}{\frac{n-1}{n-2}b+L+f}$$

Riporto di seguito un esempio pratico del calcolo del coefficiente di ritardo D, applicato alla linea Piacenza-Lavino e al nodo di Bologna:

LINEA PIACENZA-LAVINO (km 139)

	Media giornaliera di ritardo	Numero medio di treni circolanti al giorno	Valore per treno del coefficiente $D = D_0$
Treni viaggiatori a lunga percorrenza	660 ^l	115	2.48 s/km
Treni merci	3903 ^l	86	19.59 s/km

NODO DI BOLOGNA (escluso il tratto Bologna C.le-Casalecchio)

	Media giornaliera di ritardo	Numero medio di treni circolanti al giorno	Valore medio per treno D_0	Valore medio per treno D_{ferm}	Valore medio per treno $D = D_0 + D_{ferm}$
Treni passeggeri	514 ^l	225	2.81 s/km	43.18 s/km	45.99 s/km

Tabelle 12 e 13 – Esempi di calcolo del coefficiente di ritardo specifico D

Per il calcolo sono stati presi come riferimento i ritardi medi giornalieri rilevati, nel mese di marzo 2006, attraverso un'analisi diretta sulla linea e il nodo.

Per la linea Piacenza-Lavino, non essendo previste fermate intermedie, il coefficiente di ritardo specifico è pari al contributo D_0 , dovuto alle sole cause accidentali, mentre per il nodo di Bologna è stato considerato anche il contributo delle fermate in programma.

Sapendo che nel nodo di bologna, dei 225 treni giornalieri 33 transitano per Bologna Centrale mentre gli altri hanno origine/destinazione in essa, per determinare il valore di D_{ferm} sono state fatte le seguenti considerazioni:

- Per i 33 treni transitanti per Bologna Centrale si considera 1 fermata (Bologna C.le) con 3 minuti di perditempo, e 2 fermate con 1 minuto di perditempo;
- Per i restanti 192 treni si considera 1 fermata (Bologna C.le) con 1^l di perditempo e 1 fermata (termine corsa a Bologna C.le) con 1^l e 30^{ll}

Il coefficiente di stabilità X

Prima di poter definire questo coefficiente è opportuno introdurre il concetto di stabilità del flusso di treni sulla linea: un flusso di treni lungo un binario di una linea ferroviaria si definisce stabile *quando il numero degli altri treni potenzialmente influenzati dal treno generico che rallenta o si*

ferma è inferiore ad un valore m^* prestabilito, fissato dal proprietario/gestore della Rete, in relazione al livello di qualità che si prefigge di ottenere.

In base alla funzione è possibile determinare gli estremi di variabilità della stabilità:

- L'estremo superiore, a cui è associata la massima stabilità, si ha quando c'è un solo treno in circolazione fra due stazioni abilitate successive e, di conseguenza, nessun altro treno è influenzato da un suo eventuale ritardo: $m^* = 0$
- L'estremo inferiore, che rappresenta il minimo possibile di stabilità, si ha quando il numero di treni in circolazione fra due stazioni è il massimo possibile (ossia con i treni che viaggiano a distanza di blocco, nell'ipotesi che vedano sempre il "verde")

Il coefficiente di stabilità X è un coefficiente che va a moltiplicare e quindi a maggiorare (vedremo infatti che $X \geq 1$) il distanziamento minimo tra due treni che si susseguono δ_{min} . Il ragionamento alla base dell'impiego di tale coefficiente è che il deflusso è più stabile se si aumenta il distanziamento minimo, a parità di tutti gli altri parametri (lunghezza sezioni, velocità massima, sistemi di blocco, ecc.) a discapito però della capacità.

È possibile risalire al dominio di X traducendo gli estremi di variabilità della stabilità, sopra citati, in termini di coefficiente di stabilità:

- All'estremo inferiore corrisponde un coefficiente $X = 1$, per cui il valore teorico del distanziamento minimo δ_{min} rimane inalterato: il numero di treni in circolazione tra due stazioni successive è massimo (i treni sono a "distanza di blocco") e il flusso è instabile.

$$L'espressione della capacità non varia $C = \frac{\frac{\sqrt{\frac{2\gamma b}{k}}}{1+D\sqrt{\frac{2\gamma b}{k}}}}{\frac{n-1}{n-2}b+L+f}$$$

- All'estremo superiore, per avere un solo treno che circola tra due stazioni abilitate successive, dobbiamo avere un coefficiente $X_0 = \frac{L_{i-j}}{\delta_{min}} \geq 1$ dove L_{i-j} è la distanza tra le due stazioni i e j . Ad esso viene dunque associato il massimo valore di stabilità. In questo caso la

$$capacità non dipenderà più da δ_{min} ma solo dalla distanza L_{i-j} : $C = \frac{\frac{\sqrt{\frac{2\gamma b}{k}}}{1+D\sqrt{\frac{2\gamma b}{k}}}}{L_{i-j}}$$$

Il dominio di X sarà pertanto $X \in [1; \frac{L_{i-j}}{\delta_{min}} \geq 1]$

In generale il coefficiente di stabilità relativo alla tratta tra due stazioni abilitate successive i e j può essere espresso come:

$$X_{i-j} = X_{0, i-j} + \tau$$

Dove τ è un parametro che dipende da:

- Velocità del flusso
- Grado di affidabilità dei mezzi di trazione
- Caratteristiche piano - altimetriche della linea
- Caratteristiche del flusso
- Livello di servizio atteso (ossia da m^*)

In mancanza di ulteriori analisi teorico - sperimentali che mi consentano di modellizzare il parametro τ , nel proseguo della trattazione andremo a considerare solamente il termine $X_{0, i-j}$, ipotizzando dunque un legame lineare tra l'aumento del distanziamento minimo dei treni e la stabilità del flusso ($X_{i-j} = X_{0, i-j}$)

Nel caso che la distanza tra due stazioni successive vari lungo la linea, posso ricavarne il valore "globale" del coefficiente di stabilità, associato all'intera linea, facendo una media ponderata:

$$X_{\text{linea}} = \frac{\sum X_{i-j} * L_{i-j}}{\sum L_{i-j}}$$

Pertanto il valore della capacità reale, ottenuto dal valore teorico corretto attraverso i coefficienti D e X, sarà pari a:

$$C_{\text{reale}} = \frac{\frac{\sqrt{\frac{2\gamma b}{k}}}{1+D\sqrt{\frac{2\gamma b}{k}}}}{X_{\text{linea}}\left(\frac{n-1}{n-2}b+L+f\right)}$$

Funzione quindi di due variabili connesse al materiale rotabile (L_{treno}, γ), di due variabili connesse alla linea (n, b), di due variabili "trasportistiche" (D, X) e di due coefficienti di sicurezza (f, K).

2.4.1 LIVELLI DI SERVIZIO

L'analisi del coefficiente di stabilità ci consente di mettere a punto un metodo di classificazione funzionale delle linee ferroviarie, che mi indichi la qualità dello stato circolatorio. Tale classificazione dipenderà per l'appunto, oltre che dall'infrastruttura e dai treni che vi circolano, dal grado di stabilità della linea e si baserà sui "livelli di servizio".

In generale il livello di servizio, coerentemente con quanto già in uso con altri sistemi di trasporto (come nel caso stradale) esprime l'intervallo dei valori assunti dalla portata q del flusso, al quale è associato un determinato livello di qualità. Il livelli di servizio rappresentano quindi le classi di funzionamento dello stato circolatorio di un sistema di trasporto.

Un metodo per individuare tali classi di funzionamento è quello di suddividere l'intervallo $(1; X_0)$ di variabilità del coefficiente di stabilità X in un numero di parti uguali p , ottenendo quindi $(p+1)$ valori del coefficiente stesso e quindi altrettanti valori di capacità per binario C . Ciascuno di essi rappresenta un estremo di variabilità dell'intervallo dei valori di portata q del flusso, e viene

associato a uno specifico livello di servizio, che indicheremo per convenzione con le lettere A,B,C, ecc.

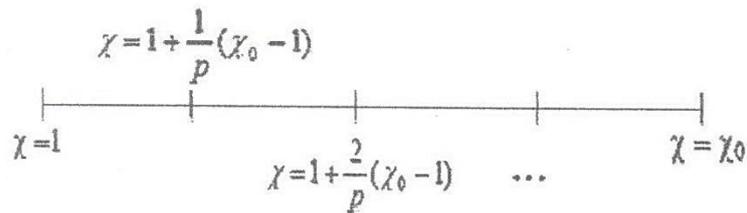


Fig 2.4.1-1 Suddivisione dell'intervallo di variabilità del coefficiente di stabilità X, funzionale all'individuazione dei livelli di servizio

Ponendo ad esempio $p = 3$ si individuano quattro valori di X ai quali corrispondono quattro valori di capacità, che a loro volta individuano quattro livelli di servizio. Tali livelli, in ordine decrescente per la qualità della circolazione ($X_A \geq X_B \geq X_C \geq X_D$) e crescente per la capacità ($C_A \leq C_B \leq C_C \leq C_D$) sono i seguenti:

$C_A = C(X_A = X_0)$	LIVELLO DI SERVIZIO A, associato al massimo valore di stabilità del flusso, ossia con un unico treno circolante tra due stazioni successive;
$C_B = C(X_B = 1 + \frac{2}{3}(X_0 - 1))$	LIVELLO DI SERVIZIO B
$C_C = C(X_C = 1 + \frac{1}{3}(X_0 - 1))$	LIVELLO DI SERVIZIO C
$C_D = C(X_D = 1)$	LIVELLO DI SERVIZIO D, associato al minimo valore di stabilità del flusso, ossia con treni che circolano a distanza di blocco, tra due stazioni.

In base all'intervallo al quale appartiene il flusso q della linea, a quest'ultima sarà assegnato il relativo livello di servizio, ossia:

se ho che $\forall q \in (0; C_A)$	allora lo stato circolatorio della linea sarà associato al livello di servizio A (qualitativamente il migliore)
$\forall q \in (C_A; C_B)$	allora lo stato circolatorio della linea sarà associato al livello di servizio B
$\forall q \in (C_B; C_C)$	allora lo stato circolatorio della linea sarà associato al livello di servizio C
$\forall q \in (C_C; C_D)$	allora lo stato circolatorio della linea sarà associato al livello di servizio D (qualitativamente il peggiore)

Per ciascun livello di servizio, e quindi per ciascun valore di capacità associato, è possibile valutare il parametro m^* associato, che rappresenta il limite prestabilito di treni coinvolti dal ritardo/rallentamento di un generico treno che precede.

A tal scopo è necessario valutare il legame che sussiste tra m^* e il coefficiente di stabilità X , andando quindi a studiare la funzione $m^* = m^*(X)$.

Il dominio della funzione può essere determinato individuando i valori di m^* associati agli estremi del dominio del coefficiente di stabilità X :

Per $X = X_0$ abbiamo un unico treno che circola tra due stazioni successive, e dunque il numero di treni che possono essere coinvolti è pari a zero $m^* = 0$

Per $X = 1$ il numero di treni che circolano sul tratto di linea compreso tra due stazioni successive è pari a $\frac{L_{i-j}}{\delta_{min}}$ che è uguale al valore di X_0 . Il numero dei treni potenzialmente coinvolti è pertanto pari al numero dei treni circolanti meno uno (quello che provoca il ritardo) $m^* = X_0 - 1$

Ipotizzando, per semplicità, la funzione $m^* = m^*(X)$ lineare, si perviene all'espressione $m^* = -X + X_0$ rappresentata graficamente dalla retta:

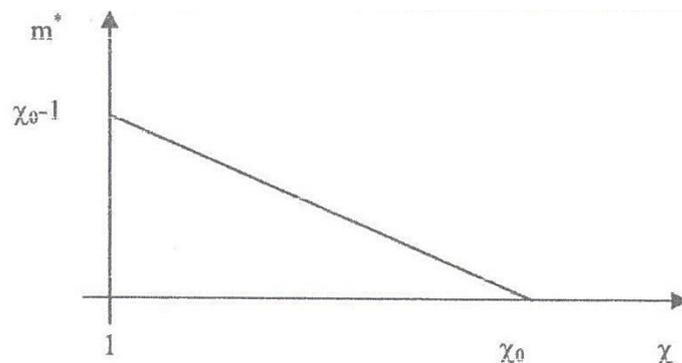


Fig 2.4.1-2 Rappresentazione grafica della funzione $m^* = m^*(X)$

Dalla funzione è possibile risalire al valore di m^* associato a ciascun livello di servizio.

Riprendendo l'esempio precedente in cui $p = 3$ individuava quattro livelli di servizio (e quindi quattro valori di capacità):

LIVELLO DI SERVIZIO A ($X_A = X_0$) $m^* = -X_A + X_0 = 0$

LIVELLO DI SERVIZIO B ($X_B = 1 + \frac{2}{3}(X_0 - 1)$) $m^* = -X_B + X_0 = \frac{X_0 - 1}{3}$

LIVELLO DI SERVIZIO C ($X_C = 1 + \frac{1}{3}(X_0 - 1)$) $m^* = -X_C + X_0 = \frac{2(X_0 - 1)}{3}$

LIVELLO DI SERVIZIO $D(X_D = 1)$

$$m^* = -X_D + X_0 = X_0 - 1$$

Il gestore della rete ferroviaria fisserà pertanto il valore m^* da assegnare alla linea in base alla qualità del servizio che vuole offrire, valutando però anche il valore della capacità ottenibile a quel livello di servizio: maggiore è la qualità della circolazione che si vuole garantire, minore è la capacità che si può realizzare.

2.5 CONSIDERAZIONI FINALI SULLA CAPACITÀ

Dall'analisi della capacità qui effettuata, in particolare dall'espressione della capacità reale nel caso di blocco fisso, è possibile affermare che non è possibile assegnare un valore assoluto di capacità ad una linea, ma una pluralità di valori dipendenti da numerose variabili.

Le caratteristiche principali che influenzano la potenzialità di una linea, emerse da questa trattazione, sono le seguenti:

- I sistemi di circolazione: dal sistema utilizzato dipende il distanziamento minimo da rispettare, oltre che la velocità massima di percorrenza.
- Il numero e la lunghezza delle sezioni di blocco: come abbiamo visto, nei sistemi basati sul distanziamento a spazio la distanza minima di sicurezza tra due treni successivi è funzione della lunghezza delle sezioni in cui è suddivisa la linea. Ridurre la loro lunghezza vuol dire ridurre il distanziamento minimo e quindi permettere la circolazione di un maggior numero di treni nell'unità di tempo. Riduzione che diventa massima (così come la capacità) con le sezioni concatenate.
- La velocità: la capacità massima si ottiene in corrispondenza della velocità critica, al di sotto di questo valore aumentare la velocità porta a una riduzione dei tempi di percorrenza e all'aumento della capacità, per velocità elevate è invece il contributo della distanza di arresto, e quindi del distanziamento minimo da garantire, a diventare più importante, a discapito della capacità. In quest'ultimo caso un modo per aumentare la capacità delle linee esistenti è proprio quello di limitare la velocità massima di percorrenza, avvicinando tale valore a quello della velocità critica. Un esempio, permesso da regolamento delle FS, è quello di poter imporre ai treni con sistema di blocco automatico a 4 codici una velocità massima di 100 km/h anziché di 180 km/h, riducendo il distanziamento minimo alla captazione del codice 180 e non più del codice 270 (riduzione di δ_{\min} di 1350 metri) e ottenendo, dunque, un aumento della capacità.
- Il numero di aspetti dei segnali: come abbiamo visto dall'espressione della capacità reale l'aumento di n consente di aumentare la potenzialità di una linea, oltre all'aumento della velocità di percorrenza e del livello di sicurezza. Esso dipende dal sistema di circolazione adottato.

- La qualità della circolazione (legata alla stabilità del flusso) e la regolarità del servizio: in base alle scelte effettuate dal gestore della rete riguardo queste due caratteristiche viene vincolata la capacità realizzabile sulla linea.

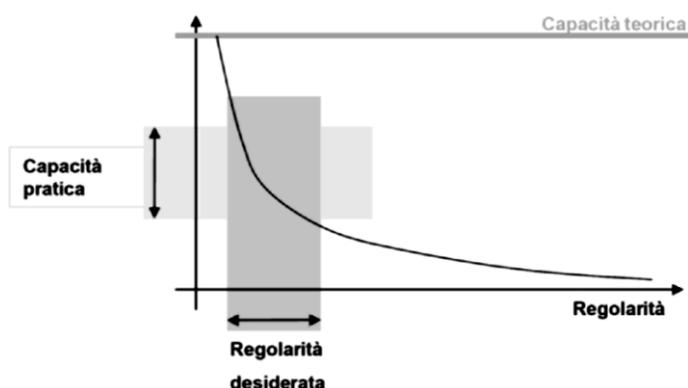


Fig 2.5-1 Rappresentazione grafica del rapporto tra capacità e regolarità

- Il materiale rotabile, le infrastrutture e i sistemi di segnalamento: il miglioramento delle loro caratteristiche può comportare un aumento della potenzialità (ad esempio un migliore sistema frenante del treno, una riduzione dei tempi di azionamento e di riassetto dei segnali, ecc.)
- I tempi di operatività e le cause di ritardo: la riduzione dei tempi morti per operazioni inerenti alla circolazione (che può essere realizzata ad esempio attraverso il perfezionamento dei metodi d'esercizio e l'alleggerimento delle eventuali regolamentazioni vincolative che li irrigidiscono, attraverso l'adozione di apparati di sicurezza più efficienti, elastici e rapidi, ecc.) e l'individuazione e la risoluzione di eventuali cause sistematiche di ritardo, consente di aumentare la potenzialità.
- Gli impianti di stazione: come accennato la capacità della linea dipende dalla potenzialità delle stazioni. Aumentare il numero dei binari, ridurre i tempi di formazione e liberazione degli itinerari, realizzare impianti che permettano velocità maggiori nei binari di corsa, ecc. sono solo alcuni degli interventi che possono garantire una maggiore potenzialità.

Quando si progetta una nuova linea bisogna pertanto tener conto di tutte queste caratteristiche, in modo da ottenere una capacità tale da soddisfare la domanda di trasporto, caratteristica fondamentale di ogni sistema di trasporto.

Per aumentare invece la potenzialità di una linea esistente (in seguito, ad esempio, ad un aumento della domanda relativa a quella linea) bisogna agire sui parametri descritti nel modo più opportuno ed eventualmente, nel caso non sia possibile in questo modo raggiungere la potenzialità desiderata, si possono aggiungere dei binari o, in determinati casi, procedere alla

banalizzazione di quelli già esistenti (soluzione indicata nel caso si abbia una domanda molto alta in una direzione rispetto a quella opposta).

Se si vuole aumentare l'offerta, e quindi la capacità usata, di una linea andando ad aggiungere servizi simili e compatibili con quelli già presenti (ad es. aggiungiamo treni con le stesse caratteristiche di quelli che già circolano: velocità, sistema frenante, ecc.), basta verificare che tale aumento sia permesso dalla capacità disponibile (capacità residua). Se così non fosse è necessario aumentare la potenzialità della linea.

Se si vogliono, invece, aggiungere servizi differenti (ad es. treni che circolano a velocità differenti da quelli già in utilizzo) si deve innanzitutto verificare l'adattabilità della linea per l'effettuazione di tali servizi, poi bisogna definire le relazioni tra i parametri caratteristici del sistema per poter quantificare parametricamente gli effetti degli interventi sul sistema stesso. Nel caso i servizi siano incompatibili con quelli già presenti sarà necessario aggiungere dei binari dividendo il tipo di traffico che circola su di essi, oppure realizzare linee differenti: un esempio è la realizzazione della rete esclusiva per treni AV/AC.

Riporto di seguito un esempio "pratico" di calcolo della capacità, basato sull'utilizzo dei coefficienti di ritardo D e di stabilità X, applicato alla linea convenzionale Piacenza-Bologna (i dati si riferiscono all'anno 2006) :

Tipologia treni	Lunghezza delle sezioni	Tratti di linea/nodo	Sistemi di circolazione e numero (virtuale) degli aspetti del segnalamento	Velocità massima del tracciato	Capacità teorica [treni/h]	Coefficienti di ritardo D e di stabilità X	Capacità reale [treni/h]
Passeggeri	900 m	Nodo Km 9522	Blocco elettrico a correnti fisse	100 km/h	48	D=45.99 s/km X=1.5	14 (1 ogni 4 ^I e 17 ^{II})
Passeggeri	1500-2000 m	Corona (Lavino-Modena) Km 27410	Blocco elettrico a correnti fisse	150 km/h	34	D=36.79 s/km X=2	7 (1 ogni 8 ^I e 34 ^{II})
Passeggeri	5000 m	Piena Linea (Modena-Piacenza) Km 109891	Blocco contassi	160 km/h	29	D=2.48 s/km X=2.5	10 (1 ogni 6 ^I)
Merci	5000 m	Piena Linea (Modena-Piacenza) Km 109891	Blocco contassi	120 km/h	22	D=19.59 s/km X=2.5	5 (1 ogni 12 ^I)

Tabella 14 – Esempio reale di calcolo della capacità, applicato alla linea convenzionale Piacenza-Bologna

Nella tabella compare una suddivisione della linea in nodo, corona e piena linea:

- Il nodo ferroviario (da non confondersi con il nodo della rete di trasporto) è l'insieme delle stazioni e delle linee che svolgono la funzione di smistamento del flusso e di risoluzione dei conflitti nell'intorno di una stazione principale, centro del nodo stesso. È caratterizzato da basse velocità di tracciato e sezioni di blocco di lunghezza ridotta.
- La corona è l'insieme delle linee afferenti al nodo ferroviario, delimitate da impianti (di diramazione e non) che svolgono la funzione di attrattori/generatori di flussi di traffico di tipo regionale, individuabili da isocrone di 30' o 60' aventi centro nella stazione principale del nodo ferroviario
- La piena linea, costituita dalle restanti linee, è caratterizzata da velocità di percorrenza più elevate e da sezioni di blocco di lunghezza maggiore.

I valori di capacità reale e teorica della tabella sono stati calcolati tenendo conto, inoltre, dei seguenti dati/caratteristiche:

- Flussi omogenei dei treni sia passeggeri che merci
- Lunghezza dei treni viaggiatori $L = 450\text{m}$
- Lunghezza dei treni merci $L = 650\text{m}$
- Decelerazione $\gamma = 0.6 \text{ m/s}^2$ per i treni nei nodi e nelle corone
- Decelerazione $\gamma = 0.5 \text{ m/s}^2$ per i treni passeggeri nella piena linea
- Decelerazione $\gamma = 0.35 \text{ m/s}^2$ per i treni merci nella piena linea
- Treni dotati del sistema SCTM con in-fill (dispositivo integrato al sistema SCTM in grado di trasmettere informazioni aggiornate al treno come ad esempio l'aspetto di un segnale a valle del treno)
- I coefficienti di ritardo sono stati calcolati prendendo come riferimento i ritardi medi giornalieri registrati nel mese di marzo 2006 sulla linea Lavino-Piacenza e nel nodo di Bologna. Per la corona, in mancanza di misurazioni dirette, si è considerato un valore pari all' 80% del coefficiente di ritardo del nodo.

Dalla tabella si può notare che i valori più alti di capacità reale sono ottenuti in corrispondenza dei nodi, in virtù della lunghezza ridotta delle sezioni, e in piena linea, in virtù del basso coefficiente di ritardo che comporta tempi di percorrenza ridotti.

Un'altra caratteristica interessante è il rapporto tra la capacità reale e quella teorica che passa dal 30-35% , nei nodi e in piena linea, al 20% circa nelle corone.

Un esempio di calcolo della capacità applicato, invece, a una nuova linea AV è il seguente:

Tipologia treni	Lunghezza delle sezioni	Tratti di linea/nodo	Sistemi di circolazione e numero (virtuale) degli aspetti del segnalamento	Velocità massima del tracciato	Capacità teorica [treni/h]	Coefficienti di ritardo D e di stabilità X	Capacità reale [treni/h]
Passeggeri	1800 m	Piena Linea	ERTMS di livello 2 (equivalente al blocco automatico a 6 aspetti)	300 km/h	30	D=2.48 s/km X=2	12 (1 ogni 5') circa il 40% della C _{teorica}

Tabella 15 – Esempio reale di calcolo della capacità applicato ad una linea AV/AC

Considerando sempre il traffico composto da flussi omogenei di treni passeggeri, con lunghezza dei treni $L = 450\text{m}$ e decelerazione $\gamma = 0.5 \text{ m/s}^2$.

In questo caso la capacità consentirebbe di far viaggiare un treno ogni 5 minuti. Nella pratica i valori di capacità reale calcolati non vengono quasi mai realizzati poiché comporterebbero costi di gestione molto elevati (numero di mezzi utilizzati, personale necessario, ecc.) e il servizio risulterebbe economicamente insostenibile.

PARTE TERZA

3.1 CONFRONTO TRA LINEE CONVENZIONALI E LINEE AV/AC IN ITALIA

Propongo ora un confronto della capacità teorica, applicato al caso di sezioni concatenate, tra le linee convenzionali ($L_{sez} = 1350m$) e le nuove linee AV/AC ($L_{sez} = 1800m$)

Lunghezza della sezione b	Numero di aspetti n	Velocità critica v^*	Capacità teorica C	Riduzione della capacità in funzione dell'aumento di L_{sez}
$b = 1350m$	$n = 3$	$v^* = 126 \text{ km/h}$	$C = 40 \text{ treni/h}$ (1 ogni 90 sec)	/
$b = 2700m$	$n = 4$	$v^* = 178 \text{ km/h}$	$C = 39 \text{ treni/h}$ (1 ogni 92 sec)	/
$b = 4050m$	$n = 5$	$v^* = 218 \text{ km/h}$	$C = 37 \text{ treni/h}$ (1 ogni 97 sec)	/
$b = 5400m$	$n = 6$	$v^* = 252 \text{ km/h}$	$C = 35 \text{ treni/h}$ (1 ogni 1 min 43 sec)	/
$b = 1800m$	$n = 3$	$v^* = 145 \text{ km/h}$	$C = 36 \text{ treni/h}$ (1 ogni 1' e 41 sec)	-10% Rispetto a $L_{sez} = 1350m$
$b = 3600m$	$n = 4$	$v^* = 206 \text{ km/h}$	$C = 35 \text{ treni/h}$ (1 ogni sec)	-10% Rispetto a $L_{sez} = 1350m$
$b = 5400m$	$n = 5$	$v^* = 252 \text{ km/h}$	$C = 33 \text{ treni/h}$ (1 ogni 1 min 49 sec)	-11% Rispetto a $L_{sez} = 1350m$
$b = 7200m$	$n = 6$	$v^* = 291 \text{ km/h}$	$C = 31 \text{ treni/h}$ (1 ogni 1 min 57 sec)	-11% Rispetto a $L_{sez} = 1350m$

Tabella 16 – Valori teorici di capacità nel caso di linee convenzionali e linee AV/AC, al variare dei parametri b e n

*Nota: sezioni di blocco della lunghezza di 1800 metri in Italia sono state realizzate solamente sulle linee AV/AC, dotate del sistema ERTMS di livello 2, comparabile a un sistema di blocco automatico con aspetti del segnalamento $n = 6$. Gli altri casi (con 3,4,5 aspetti del segnalamento) non trovano alcuna applicazione ma vengono qui utilizzati per analizzare l'andamento della capacità.

I valori riportati nella tabella sono stati calcolati facendo riferimento ai seguenti parametri:

- Lunghezza del treno $L = 450m$
- Decelerazione $\gamma = 0.5m/s^2$

- Franco di sicurezza $f = 20\text{m}$
- Coefficiente di sicurezza $K = 1.1$

Dalla tabella risulta evidente come, nella pratica, introdurre sistemi di circolazione che consentano di conoscere lo stato di occupazione di un numero maggiore di sezioni di blocco (ossia passare dal sistema di blocco automatico a correnti fisse, al sistema di blocco automatico a correnti codificate a 9 codici o all'ERTMS di livello 2 nel caso della linea AV/AC) comporti una riduzione della capacità. L'utilizzo di sistemi di circolazione migliori comporta infatti un aumento del numero di aspetti del segnalamento n con un conseguente aumento della lunghezza della sezione b : nei casi pratici ($L_{\text{sez}} = 1350\text{m}$ o 1800m) è l'aumento del parametro b ad avere un peso maggiore, portando per l'appunto ad una riduzione della capacità.

Tuttavia, a fronte di una riduzione contenuta della capacità (passando da $n=3$ a $n=6$ la capacità diminuisce di circa il 12-14%), l'introduzione dei sistemi di circolazione più innovativi permette di raggiungere velocità molto più elevate (nel caso di linee convenzionali si passa dai 150 km/h ai 250 km/h). Di seguito riporto le velocità massime consentite dai vari sistemi di blocco.

Linee convenzionali:

- Blocco automatico a correnti fisse $n = 3$ $b = 1350\text{m}$ $V_{\text{max}} = 150 \text{ km/h}$
- Blocco automatico a correnti codificate a 4 codici $n = 4$ $b = 2700\text{m}$ $V_{\text{max}} = 180 \text{ km/h}$
- Blocco automatico a correnti codificate a 9 codici $n = 6$ $b = 5400\text{m}$ $V_{\text{max}} = 250 \text{ km/h}$

Linee AV/AC:

- Blocco radio (ERTMS di livello 2) n (virtuale) = 6 $b = 7200\text{m}$ $V_{\text{max}} = 300 \text{ km/h}$

Il passaggio da una lunghezza della sezione (L_{sez}) di 1350m a 1800m, a parità di aspetti del segnalamento (uguali sistemi di circolazione), prevede una riduzione della capacità, di circa il 10-11%, in seguito all'aumento del parametro b e quindi del distanziamento minimo. Anche in questo caso però la riduzione della capacità è accompagnata da un aumento della velocità massima di circolazione, dovuta alla maggiore distanza disponibile per arrestarsi.

Infine dalla tabella possiamo notare come nel passaggio dalla linea convenzionale con $n = 6$ alla linea AV con $n = 3$ (a cui corrispondono costi di gestione minori) la capacità sia all'incirca la medesima, ottenibile però a velocità decisamente più ridotte (145 km/h rispetto ai 252 km/h)

3.2 LEGAME VELOCITÀ - CAPACITÀ

Così come dall'analisi del coefficiente X e l'introduzione dei livelli di servizio avevamo potuto notare il forte legame che sussiste tra capacità e qualità della circolazione, dal precedente confronto emerge un'altra importante dipendenza, quella tra capacità e velocità di circolazione: aumentare una di queste due caratteristiche penalizza l'altra.

Come avevamo visto all'inizio di questa trattazione la rapidità è una caratteristica fondamentale del sistema ferroviario, che invoglia l'utente ad utilizzarlo: se realizzo un servizio che mi garantisce un'alta capacità ma velocità basse, l'utente sarà disincentivato ad utilizzare il sistema ferroviario a favore di sistemi alternativi come l'automobile che, a parità di tempi di percorrenza, presenta diversi vantaggi: comfort, flessibilità dell'orario di partenza, ecc. Uno dei fattori su cui bisogna puntare per promuovere il sistema ferroviario sono proprio i limiti di velocità raggiungibili su strada per motivi di sicurezza, che possono essere ampiamente superati dai treni grazie ai sistemi di controllo e di sicurezza di cui dispongono.

Al tempo stesso però l'utente si aspetta di poter usufruire del servizio quando ciò gli è più ideale, senza essere eccessivamente vincolato dagli orari di partenza e di arrivo: bisognerà quindi garantire il servizio con una certa frequenza.

Sarà dunque necessario determinare, di caso in caso, quale sia il giusto compromesso tra i valori di queste due caratteristiche, in funzione della situazione in cui si sta operando: sulle grandi distanze, ad esempio, si andrà ovviamente a prediligere la velocità, in favore della riduzione dei tempi di percorrenza, rispetto alla capacità.

Conclusioni

Attraverso questa trattazione, dopo un'analisi prettamente teorica, ho potuto dimostrare come l'introduzione del distanziamento spaziale basato sul blocco mobile, consentirebbe di ottimizzare la capacità di una linea ferroviaria, rispetto ai sistemi attualmente in uso, basati sul blocco fisso. L'utilizzo del blocco mobile porterebbe ulteriori vantaggi anche nella regolarità della circolazione, migliorandone la gestione, nella sicurezza e in campo economico. Attualmente il sistema non ha ancora trovato alcuna applicazione pratica ed ancora in fase di studio, pertanto i risultati pervenuti sono puramente teorici: per un riscontro con la pratica bisognerà attendere una sua eventuale realizzazione.

Spostandomi sul campo pratico ho poi analizzato la capacità reale, valutando nel dettaglio tutte le variabili da cui essa dipende e prestando particolare attenzione alle caratteristiche di velocità e di qualità della circolazione, che insieme alla capacità costituiscono le caratteristiche principali del sistema di trasporto ferroviario, come descritto proprio all'inizio di questa trattazione. Dai dati ricavati, in particolare dall'analisi del coefficiente di stabilità X , con l'introduzione dei livelli di servizio, e dal confronto tra la capacità delle linee convenzionali e delle linee AV, è emerso come realizzare servizi caratterizzati da alte velocità ed elevati livelli di servizio vada a discapito della capacità (con una conseguente ripercussione sui costi del viaggio/ricavi). Quando si progetta e si gestisce una linea ferroviaria sarà dunque opportuno trovare il giusto compromesso tra queste caratteristiche, relativamente alla situazione in cui si sta operando. Sarà compito dell'ente gestore stabilire quali caratteristiche prediligere e in quale quantità, a seconda del servizio che si vuole offrire.

Bibliografia

- Bargiacchi A., Migliorini C., *Riordino normativo: sull’Autorizzazione al Movimento*, in “La Tecnica Professionale”, a. XXI, n.3, Marzo 2014;
- Caronti D., Ciaffi M., Senesi F., *ERTMS via satellite*, in “La Tecnica Professionale”, a. XXI, n.1, Gennaio 2014;
- Caronti D., Marcoccio S., Olmi A., Senesi F., *ERTMS/ETCS Livello 2 su rete convenzionale*, in “La Tecnica Professionale”, a. XXI, n.5, Maggio 2014;
- Genovesi P., Ronzino C. D., *Flussi e capacità delle linee ferroviarie a doppio binario*, in “Ingegneria Ferroviaria”, a.LXI, n.7-8, Luglio-Agosto 2006;
- Guida P., Milizia E., *Dizionario Ferroviario*, Roma, CIFI, 2006;
- Lupi M., *Elementi di circolazione ferroviaria*, Dispense del corso, Università degli Studi di Bologna, 2006
- Mayer L, *Impianti Ferroviari, Volume 1 e 2*, Roma, CIFI, 2004
- Ricci S, *trasporti ferroviari*, dispense del corso , università di Roma “sapienza”, 2012
- Ronzino C. D., *Un’ipotesi di classificazione funzionale delle linee ferroviarie convenzionali a doppio binario*, in “La Tecnica Professionale”, a.XV, n.9, Settembre 2008;
- Vicuna G., *Organizzazione e tecnica ferroviaria*, Roma, CIFI, 1989;
- UIC Leaflet 405-1, *Method to be Used for the Determination of the Capacity of Lines*, International Union of Railways, 1983;
- UIC Leaflet 405 OR, *Links between Railway Infrastructure Capacity and the Quality of Operations*, International Union of Railways, 1996;
- UIC, *Influence of ETCS on the line capacity*, International Union of Railways, 2008;
- UIC, *Influence of the European Train Control System (ETCS) on the capacity of nodes*, International Union of Railways, 2010.

SITOGRAFIA

Si riportano i siti web maggiormente consultati:

- www.rfi.it (Rete Ferroviaria Italiana SpA – RFI);
- www.trenitalia.it (Trenitalia SpA);