



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI PADOVA



DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE  
CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA  
DELL'ENERGIA ELETTRICA

TESI DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA  
DELL'ENERGIA ELETTRICA

IL SEGNALAMENTO: PRINCIPI E TECNOLOGIE PER  
LA REGOLAZIONE DEL TRAFFICO FERROVIARIO

RELATORE: Prof. Roberto Turri

LAUREANDO: Ludovico Zampiero

ANNO ACCADEMICO 2015-16

## Sommario

<b>INDICE DELLE FIGURE</b> .....	4
<b>INDICE DELLE TABELLE</b> .....	7
<b>INTRODUZIONE</b> .....	9
<b>1. SISTEMA DI TRASPORTO FERROVIARIO</b> .....	11
1.1 RETE FERROVIARIA .....	11
1.2 DISTANZIAMENTO TRENI.....	15
1.3 SEZIONI DI BLOCCO .....	16
1.4 SISTEMI DI BLOCCHI.....	17
1.4.1 SISTEMI DI BLOCCO FISSO .....	18
1.4.2 SISTEMI DI BLOCCO MOBILE.....	20
1.4.3 SUDDIVISIONE DEI SISTEMI DI BLOCCO .....	23
1.4.4 CIRCUITI DI BINARIO.....	31
<b>2. CAPACITA'</b> .....	33
2.1 CAPACITÀ TEORICA.....	33
2.1.1 BLOCCO MOBILE – CAPACITA' TEORICA .....	34
2.1.2 BLOCCO FISSO - CAPACITÀ TEORICA.....	38
2.1.3 CONFRONTO TRA BLOCCO MOBILE E BLOCCO FISSO .....	41
2.2 CAPACITÀ REALE E METODI DI CALCOLO .....	42
2.2.1 MODELLO STATICO FS .....	43
2.2.2 MODELLI ANALITICI PROBABILISTICI: IL METODO UIC .....	44
2.2.3 MODELLI ANALITICI PROBABILISTICI: IL METODO DB.....	46
2.2.4 CONFRONTO TRA I METODI ANALITICI.....	47
2.2.5 MODELLI ANALOGICI DI SIMULAZIONE .....	48
2.3 CONSIDERAZIONI FINALI SULLA CAPACITÀ.....	50
<b>3. SISTEMI DI SICUREZZA</b> .....	51
3.1 RIPETIZIONE DEI SEGNALI A BORDO DEI LOCOMOTORI .....	51
3.1.1 SISTEMA DI SUPPORTO ALLA CONDOTTA - SSC.....	53
3.1.1.1 SOTTOSISTEMA DI TERRA - SST.....	54
3.1.1.2 SOTTOSISTEMA DI BORDO - SSB.....	55
3.1.1.3 TRASFERIMENTO DI INFORMAZIONI TRA SST E SSB .....	57
3.1.2 SISTEMA DI CONTROLLO DELLA MARCIA DEI TRENI – SCMT.....	58
3.1.2.1 SOTTOSISTEMA DI TERRA SCMT .....	60
3.1.2.2 SOTTOSISTEMA DI BORDO SCMT .....	62
3.1.3 SCC e CTC PER IL TELECOMANDO DELLA CIRCOLAZIONE .....	63
<b>4. MODELLO DI FRENATURA RFI DA UTILIZZARE PER IL SOTTOSISTEMA DI BORDO</b> .....	65
4.1 MODELLO DI FRENATURA A GRADINO .....	65
4.2 APPLICAZIONE DEL MODELLO FRENATURA .....	67
4.2.1 CALCOLO DELLO SPAZIO .....	68
4.2.2 CALCOLO DI $t_{ff}$ .....	69

4.2.3	CALCOLO DI $d_i$ .....	71
4.2.4	CALCOLO DI $d_p$ .....	72
4.2.5	CALCOLO DI $K_0$ .....	72
4.2.6	CALCOLO DI $K_C$ .....	73
4.2.7	DEFINIZIONE DI $K_r$ .....	73
4.2.8	CALCOLO $d_r$ .....	73
4.2.9	DEFINIZIONE DI $V_\beta$ .....	74
<b>5.</b>	<b>APPARATI CENTRALI</b> .....	<b>75</b>
5.1	APPARATI CENTRALI ELETTRICI A LEVE SINGOLE.....	77
5.2	APPARATI CENTRALI ELETTRICI A PULSANTI DI ITINERARIO.....	77
5.3	APPARATI CENTRALI STATICI.....	78
5.5	APPARATI CENTRALI STATICI MULTISTAZIONE (ACMS).....	79
<b>6.</b>	<b>RETE FERROVIARIA EUROPEA</b> .....	<b>80</b>
6.1	VERSO L'INTEROPERABILITA' FERROVIARIA EUROPEA.....	80
6.2	TRANS-EUROPEAN NETWORKS – TRANSPORT E CORRIDOI EUROPEI.....	81
6.3	STANDARD DELLE RETI STORICHE .....	85
<b>7.</b>	<b>ERTMS - European Rail Traffic Management System/European Train Control System</b> .....	<b>89</b>
7.1	EUROBALISE.....	91
7.2	ETCS Livello 0.....	92
7.3	ETCS Livello 1.....	93
7.4	ETCS Livello 2.....	96
7.4.1	CONNESSIONE RADIO.....	99
7.5	ETCS Livello 3.....	100
7.5.1	ERTMS/ETCS Livello 3 E INTEGRAZIONI CON Global Navigation Satellite System (GNSS).....	101
7.6	CAPACITA' ERTMS/ETCS A CONFRONTO .....	102
7.7	ERTMS - REGIONAL.....	105
	<b>CONCLUSIONE</b> .....	<b>107</b>
	<b>APPEDICE A</b> .....	<b>109</b>
	SOFTWARE OpenTrack .....	109
	SOFTWARE RailSys.....	111
	<b>APPENDICE B</b> .....	<b>113</b>
	SCRIPT MATLAB PER IL CALCOLO DELLO SPAZIO DI FRENATURA A SEGUITO DI ATTIVAZIONE DELLA FRENATURA DI EMERGENZA DA PARTE DEL SSB.....	113
	<b>BIBLIOGRAFIA</b> .....	<b>117</b>
	<b>SITOGRAFIA</b> .....	<b>119</b>

## INDICE DELLE FIGURE

Figura 1- Cabina di guida del Freccia Rossa 1000.....	10
Figura 2 - Rete ferroviaria italiana (RFI).....	12
Figura 3 - Spazio di arresto.....	15
Figura 4 - Aspetto dei segnali nel caso di sezioni.....	17
Figura 5 - Esempio blocco fisso con automobili.....	17
Figura 6 - Esempio blocco mobile con automobili.....	18
Figura 7 - Distanziamento con blocco fisso e trasmissione continua.....	19
Figura 8 - Distanziamento con blocco fisso e trasmissione discontinua.....	19
Figura 9 - Sistema di blocco fisso.....	20
Figura 10 - Tipo di blocco mobile.....	21
Figura 11 - Distanziamento minimo con blocco mobile relativo.....	21
Figura 12 - Sistema di blocco mobile.....	23
Figura 13 - Blocco telefonico.....	23
Figura 14 - Incidente del 12 luglio sulla linea pugliese.....	24
Figura 15 - Istrumento di blocco.....	25
Figura 16 - Blocco conta assi.....	26
Figura 17 - Blocco conta assi con posto di blocco intermedio.....	26
Figura 18 - Blocco Elettrico Automatico a Correnti Codificate.....	27
Figura 19 - Esempio di interruzioni al minuto.....	27
Figura 20 - Captazione delle correnti codificate: correnti del CdB, Campo magnetico indotto dalle correnti del CdB e circuito di captazione.....	28
Figura 21 - Sistema a 9 codici.....	28
Figura 22 - Significato di ciascuno dei 9 codici.....	29
Figura 23 - Blocco mobile e Trasmissione Radio.....	29
Figura 24 - Transizione tra aree controllate nel CBTC.....	30
Figura 25 - Circuito di binario con sezione di blocco libera.....	31
Figura 26 - Circuiti di binario con sezione di blocco libera.....	31
Figura 27 - Connessioni induttive tra le sezioni di blocco adiacenti.....	32
Figura 28 - Curva di deflusso q-v.....	35
Figura 29 - Lunghezza della sezione b.....	38
Figura 30 - Esempio lunghezza della sezione b con blocco automatico a 4 codici.....	39
Figura 31 - Curva di deflusso q-v nel caso di blocco fisso.....	40
Figura 32 - Confronto blocco fisso e blocco mobile.....	41
Figura 33 - Rapporto intensità di traffico e numero di treni in coda.....	45
Figura 34 - Metodo per determinare q.....	47
Figura 35 - Sistema di ripetizione segnali digitale discontinua.....	52
Figura 36 - Sistema di ripetizione segnali continua.....	52
Figura 37 - Punto informativo.....	54
Figura 38 - Caratteristiche tecniche SST.....	55
Figura 39 - Schema SSB dell'SSC.....	56

Figura 40 - Caratteristiche tecniche .....	57
Figura 41 - Trasferimento telegrammi SSC.....	57
Figura 42 - Panoramica italiana dei sistemi tecnologici di sicurezza .....	59
Figura 43 - Schema SST del SCMT.....	60
Figura 44 - Catena di appuntamento di PI nel SCMT.....	61
Figura 45 - Caratteristiche tecniche .....	61
Figura 46 - Schema del SSB del SCMT .....	62
Figura 47 - Linee telecomandate.....	64
Figura 48 - Rappresentazione del modello di frenatura a gradino.....	66
Figura 49 - Esempio di differenza tra massa reale (peso reale) e massa frenata per il calcolo della “percentuale di massa frenante” .....	68
Figura 50 - Esempio di sala di controllo per la supervisione della circolazione ferroviaria .....	75
Figura 51 - Schema di funzionamento di un apparato centrale .....	76
Figura 52 - Banco di manovra di un Apparato Centrale Elettrico a leve singole .....	77
Figura 53 - Banco di manovra ed armadio di un ACEI .....	78
Figura 54 - Corridoi Europei TEN-T.....	83
Figura 55 - Corridoi ferroviari europei .....	83
Figura 56 - Tratta italiana del corridoio A.....	84
Figura 57 - Tratta italiana del corridoio B.....	84
Figura 58 - Tratta italiana del corridoio D .....	85
Figura 59 - Sistemi di alimentazione in Europa .....	86
Figura 60 - Gabarit in Europa .....	86
Figura 61 - Diversi standard UIC per il gabarit.....	87
Figura 62 - Scartamento in Europa.....	87
Figura 63 - Sistemi di segnalamento in Europa .....	88
Figura 64 - Struttura ERTMS.....	90
Figura 65 - Alcune balise installate lungo i binari.....	91
Figura 66 - Trasmissione del telegramma tra Eurobalise e antenna del rotabile.....	92
Figura 67 - ETCS di livello 0.....	92
Figura 68 - Operatività ETCS Livello 1 senza infill .....	93
Figura 69 - Componenti tecnologiche nell'ETCS Livello 1.....	94
Figura 70 - Operatività ETCS Livello 1 con Infill .....	95
Figura 71 - Componenti tecnologiche nell'ETCS livello 1 Infill.....	95
Figura 72 - Schema di massima rappresentativo del livello 2 .....	96
Figura 73 - Componenti tecnologiche nell'ETCS Livello 2.....	97
Figura 74 - Ridondanza di copertura delle BTS.....	97
Figura 75 - Antenne BTS (Base Transceiver Station) .....	98
Figura 76 - Fotografia in macchina della Driver Machine Interface .....	99
Figura 77 - Schema rappresentativo ERTMS livello 2 .....	99
Figura 78 - Operatività ETCS Livello 3.....	100
Figura 79 - Confronto tra i diversi sistemi ERTMS .....	103

Figura 80 - Grafico d'incremento di potenzialità per linee di alta velocità (ETCS livello 1 = 100%).....	103
Figura 81 - Grafico d'incremento di potenzialità per linee principali convenzionali (ETCS livello 1 = 100%) .....	104
Figura 82 - Grafico d'incremento di potenzialità per linee locali-regionali (ETCS livello 1 = 100%).....	104
Figura 83 - Differenti categorie di linea.....	105
Figura 84 - Schema di funzionamento di base della struttura ERTMS REGIONAL.....	106
Figura 85 - Architettura del software OpenTrack (Nash, Huerlimann, 2004).....	109
Figura 86 - Esempio del modello di rete nel software OpenTrack .....	110
Figura 87 - Esempio di diagramma spazio-velocità fornito da OpenTrack.....	110
Figura 88 - Applicazione frenatura con blocco fisso.....	111
Figura 90 - Statistiche sull'occupazione dell'infrastruttura (nell'esempio la percentuale di occupazione in ora di punta) .....	112

## INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1 - Dati relativi alle linee ferroviarie in esercizio forniti da RFI .....	13
Tabella 2 - Dati relativi alla lunghezza complessiva dei binari forniti da RFI .....	14
Tabella 3 - Dati relativi agli impianti ferroviari forniti da RFI .....	14
Tabella 4 - Dati relativi alle tecnologie innovative di protezione marcia treno forniti da RFI.....	14
Tabella 5 - Tabella del coefficiente $\Phi$ , in funzione della velocità, da inserire nella formula di Pedelucq .....	16
Tabella 6 - esempi di capacità e velocità critica .....	36
Tabella 7 - Capacità teorica al variare della decelerazione .....	37
Tabella 8 - Capacità teorica al variare della lunghezza del treno .....	37
Tabella 9 - Esempi di modelli con le diverse caratteristiche .....	49
Tabella 10 - Indicazioni in cabina dei codici captati .....	53
Tabella 11 - Variabili di ingresso.....	67
Tabella 12 - Velocità di esercizio e di prova .....	68
Tabella 13 - Parametro $D_t$ .....	69
Tabella 14 - Parametri per il calcolo di $t_{ff}$ .....	70
Tabella 15 - Parametro L .....	70
Tabella 16 - Parametri $L_V$ e $L_M$ .....	71
Tabella 17 - Parametri per il calcolo di $d_i$ .....	71
Tabella 18 - Parametro $c_f$ .....	72
Tabella 19 - Parametri $n_C$ e $V_C$ .....	73
Tabella 20 - Parametro $K_f$ .....	73
Tabella 21 - Parametri per il calcolo di $d_r$ .....	74
Tabella 22 - Dati di input necessari al calcolo dello spazio di frenatura.....	115



## INTRODUZIONE

Uno dei segni tangibili del livello di civilizzazione di uno stato sono le infrastrutture di trasporto su rotaia (ferrovie, tranvie e metropolitane); esse presentano molti vantaggi:

- permettono di spostare un elevato numero di persone;
- garantiscono una maggiore sicurezza rispetto al trasporto su gomma;
- presentano un ridotto impatto ambientale visto che la trazione è, in molti casi, elettrica e vi è la possibilità di installazioni underground;
- riducono il traffico stradale;
- consentono un notevole comfort per i passeggeri.

Vista la natura fallibile della supervisione umana, come dimostra l'ultimo tragico episodio di cronaca avvenuto sulla linea Bari-Nord il 12 luglio 2016, si sta cercando di passare dai tradizionali meccanismi di segnalazione luminosa, che vanno interpretati dai macchinisti, ai moderni sistemi di controllo computerizzato (computer-based) basati su segnali interpretabili in modo autonomo dal sistema di controllo di bordo.

Decenni di ricerca hanno permesso di sviluppare un sistema di controllo sufficientemente sicuro che ha dato il via alla diffusione dei treni cosiddetti ad Alta velocità (AV). L'AV ha rappresentato il primo caso di un sistema ferroviario in Italia, e non solo, a sostituire tutti i segnali luminosi con segnali "virtuali"; il treno, che opera l'alta velocità, riceve informazioni grazie a pacchetti dati trasmessi su reti wireless.

Bisogna dire che anche la gestione delle tradizionali logiche di segnalamento, finalizzate essenzialmente ad attivare i segnali luminosi e muovere i deviatori, si sta spostando progressivamente da una realizzazione tramite relè (dispositivi elettromeccanici) a sistemi computerizzati cosiddetti di "gestione della via" (o *inter-locking*). Affinché l'automazione sia completa, però, anche la trasmissione dei segnali da terra a bordo deve essere realizzata attraverso protocolli di elaborazione e comunicazione dati digitali. Questo è ciò che avviene nei sistemi di *Automatic Train Protection* (ATP), in cui è il sistema di bordo a ricevere i segnali virtuali e ad attivare automaticamente la frenatura in caso di pericolo. Tali segnali sono inviati attraverso opportuni pacchetti dati che contengono, tra le altre informazioni, la distanza che il treno deve mantenere per garantire la sicurezza e le limitazioni di velocità della tratta.

Il moderno standard ERTMS/ETCS<sup>1</sup> appartiene alla categoria dei sistemi ATP evoluti: la velocità del treno è supervisionata dal sistema al punto tale che il macchinista deve soltanto seguire le indicazioni che compaiono sulla strumentazione di bordo, ovvero sul *cockpit* DMI (*Driver Machine Interface*); tale standard, nato con lo scopo di migliorare prestazioni, sicurezza, affidabilità e interoperabilità delle linee ferroviarie trans-europee, è stato adottato in Italia su tutte le nuove linee AV, in cui sono completamente assenti i tradizionali segnali luminosi. Pertanto, la marcia a vista da parte del macchinista non è consentita se non in condizioni di degrado (esempio, malfunzionamento di alcuni apparati) e ad una velocità molto ridotta (poche decine di km/h). D'altronde, a velocità elevate (fino a 300 km/h) il macchinista non avrebbe alcuna possibilità di interpretare visivamente un segnale laterale reagendo per tempo ad eventuali situazioni di pericolo, dal momento che lo spazio medio di frenatura per l'arresto completo del treno è

---

<sup>1</sup> *European Railway Traffic Management System / European Train Control System*

dell'ordine dei chilometri. Si tratta quindi di una classe di sistemi di controllo che appartengono alla categoria *real-time safety-critical*: un eventuale malfunzionamento (che può essere anche un ritardo nella risposta del sistema) può avere conseguenze catastrofiche in termini di incolumità dei passeggeri oltre che di danni all'ambiente circostante.

Attualmente esistono diverse linee ferroviarie basate sullo standard ERTMS/ETCS già in esercizio in Europa (con l'Italia tra i pionieri, con la tratta AV Roma-Napoli attivata nel Dicembre 2005) e numerosi progetti in corso nel resto del mondo, per un investimento totale che copre quasi 40.000 km, realizzati da consorzi che comprendono le aziende Ansaldo STS, Alcatel, Alstom, Bombardier, Invensys Rail e Siemens.

In questa tesi si intendono analizzare le caratteristiche degli impianti di segnalamento esistenti, illustrandone l'importanza, riportandone gli aspetti tecnici e presentandone le dinamiche e le prospettive di sviluppo.



**Figura 1- Cabina di guida del Freccia Rossa 1000**

# 1. SISTEMA DI TRASPORTO FERROVIARIO

Il trasporto ferroviario, per l'importanza che assume nel quadro delle attività economiche nazionali, è contraddistinto dalle seguenti caratteristiche principali:

- **Capacità:** corrisponde al 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 del servizio e la regolarità della circolazione costituiscono una necessità oltre che una finalità.
- **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 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.
- **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;
- **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 e, pertanto, dovrebbe essere 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; sarà il gestore della rete a stabilire quali caratteristiche prediligere per ogni linea, in funzione del servizio che vuole offrire.

## 1.1 RETE FERROVIARIA

La rete ferroviaria è costituita da un insieme di infrastrutture e 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, dove:

- 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.
- 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 su linee dotate di uno o più binari e si parla, quindi, 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 mentre l'altro binario è 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.

La Rete Ferroviaria Italiana (RFI) comprende 16.726 km di linea che possono essere 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;
- **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.



**Figura 2 - Rete ferroviaria italiana (RFI)**

Nelle seguenti tabelle sono riportati i dati relativi al 30 giugno 2016, che descrivono la RFI:

**Tabella 1 - Dati relativi alle linee ferroviarie in esercizio forniti da RFI**

<b>LINEE FERROVIARIE IN ESERCIZIO</b>	<b>Tot 16.726km</b>
Classificazione	
Linee fondamentali	6.442km
Linee complementari	9.338km
Linee di nodo	946km
Tipologia	
Linee a doppio binario	7.574km
Linee a semplice binario	9.151km
Alimentazione	
Linee elettrificate	11.943km
• A doppio binario	7.497
• A semplice binario	4.456km
Linee non elettrificate (diesel)	4.783km

**Tabella 2 - Dati relativi alla lunghezza complessiva dei binari forniti da RFI**

<b>LUNGHEZZA COMPLESSIVA DEI BINARI</b>	<b>24.300km</b>
Linea convenzionale	22.950km
Linea AV	1.350km

**Tabella 3 - Dati relativi agli impianti ferroviari forniti da RFI**

<b>IMPIANTI FERROVIARI</b>	
Stazioni con possibilità di servizio viaggiatori	2.209
Impianti di traghettamento	3
Impianti merci	218

**Tabella 4 - Dati relativi alle tecnologie innovative di protezione marcia treno forniti da RFI**

<b>TECNOLOGIE INNOVATIVE DI PROTEZIONE MARCIA TRENO</b>	
Sistema di telecomando della circolazione (SCC/CTC+DPC)	12.077 km <sup>2</sup>
SCMT – Per il controllo della marcia treno	11.856 km <sup>3</sup>
SSC – Per il supporto alla guida	4.213 km
ERTMS – Per l'interoperabilità su rete AV/AC	654 km

<sup>2</sup> Di cui 181 con doppio attrezzaggio SCMT-SSC.

<sup>3</sup> Di cui 181 con doppio attrezzaggio SCMT-SSC.

## 1.2 DISTANZIAMENTO TRENI

In ambito ferroviario, i provvedimenti tecnici ed organizzativi necessari per assicurare il corretto distanziamento fra i treni costituiscono il **sistema di circolazione**.

Un tratto di linea ferroviaria può essere a singolo binario o a binario doppio (o multiplo). Nel caso di linee a singolo binario la circolazione avviene alternativamente nei due sensi di marcia e l'incrocio tra i treni deve e può avvenire solo in stazione, dove sono preposti almeno due binari. Nel caso di doppio binario i due binari possono essere utilizzati in modo specializzato per i due versi di marcia oppure, in funzione delle esigenze del servizio, ciascuno dei due binari può essere utilizzato indifferentemente nei due sensi di marcia.

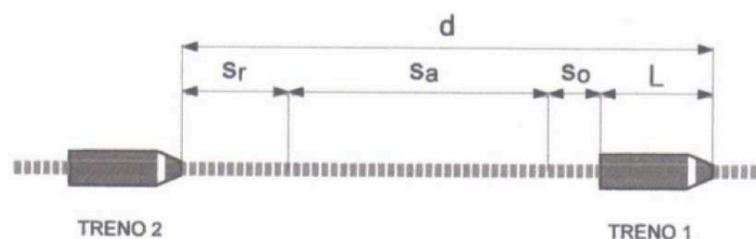
La circolazione su guida vincolata, per sua natura, impone una traiettoria da seguire e impedisce scostamenti anche minimi da essa. La circolazione può avvenire in sicurezza dunque solo se si garantiscono condizioni di marcia che regolino il movimento del treno non solo in relazione alle condizioni del percorso (come pendenze, curve, eccetera), ma anche rispetto al movimento degli altri veicoli presenti nella stessa linea.

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.

Il distanziamento tra due treni dovrà, perciò, 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 blocco del treno che lo precede.

Questa distanza di sicurezza 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;
- $S_a$  che è lo spazio di frenatura necessario al treno per arrestarsi;
- $S_o$  che è un ulteriore spazio di sicurezza.



**Figura 3 - Spazio di arresto**

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

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

avendo indicato con  $v$  la velocità, con  $a$  la decelerazione media e con  $L$  la lunghezza del treno.

Il distanziamento temporale  $\Delta t$ , ossia l'intervallo di tempo tra il passaggio dei due treni in una stessa sezione di linea, sarà invece pari a:

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

### 1.3 SEZIONI DI BLOCCO

Il distanziamento tra treni è attuato suddividendo la linea ferroviaria in tratti di lunghezza prefissata, denominati **sezioni di blocco**; per la sicurezza della circolazione può esserci un solo treno in ogni sezione di blocco, anche se sulla linea viaggiano più treni.

Questo sistema di circolazione prende il nome di “distanziamento a spazio” e si distingue da quello “a tempo” che non è praticamente più utilizzato.

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

Lo spazio di arresto del treno, che segue quello leader, può essere calcolata con la formula di Pedelucq:

$$S_a = \frac{V^2}{\frac{1.09375 \lambda_c}{\Phi(V)} + \frac{0.127}{\Phi(V)} \pm 0.235 I}$$

Dove:

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

$\lambda_c$  è la percentuale di massa frenata (es 120%  $\lambda_c = 1,2$ )

I è la pendenza della linea in per mille

$\Phi$  è un coefficiente funzione della velocità iniziale V , il cui valore può essere ricavato dalla tabella qui sotto:

V	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200
$\Phi$	0.068	0.069	0.069	0.071	0.073	0.074	0.075	0.076	0.077	0.077	0.078

**Tabella 5 - Tabella del coefficiente  $\Phi$ , in funzione della velocità, da inserire nella formula di Pedelucq**

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).

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;
- segnala 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.



**Figura 4 - Aspetto dei segnali nel caso di sezioni**

La distanza fra il segnale di avviso e il segnale di prima categoria dev'essere almeno pari alla distanza di arresto del treno.

In Italia le Ferrovie dello Stato (FS) hanno stabilito la lunghezza delle sezioni di blocco, 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 BLOCCHI

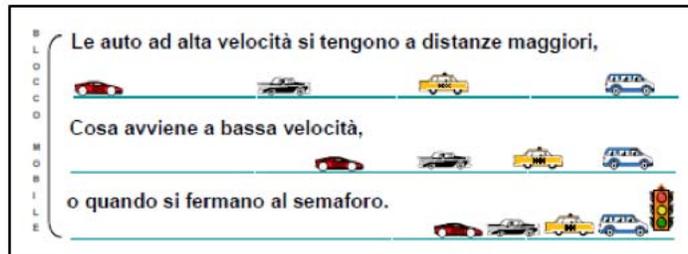
I sistemi di blocco si suddividono in due categorie:

- **Sistemi di blocco fisso:** sono basati sulla divisione della linea in tratte ben distinte in cui il treno viene rilevato e “occupa” la tratta. Con questo sistema di blocco i treni sono distanziati in relazione al numero di sezioni che consentono al treno di arrestarsi, prima di impegnare la sezione occupata dal treno precedente; dunque in ogni sezione c'è al massimo un treno.



**Figura 5 - Esempio blocco fisso con automobili**

- **Sistemi di Blocco Mobile:** sono sistemi basati sulla localizzazione puntuale del treno realizzata direttamente dal sistema di bordo e dal personale di condotta (PdC). Con questo sistema di blocco i veicoli sono in grado di seguire la coda di quelli che li precedono.



**Figura 6 - Esempio blocco mobile con automobili**

Come gli stessi nomi suggeriscono la sostanziale differenza tra i due sistemi di blocco è che con il sistema a blocco fisso la distanza tra un treno e l'altro non varia con la velocità, mentre con il sistema a blocco mobile la distanza varia con la velocità. A differenza delle automobili, per il trasporto su rotaia gli spazi di frenatura sono solitamente maggiori della distanza di visibilità del PdC. Di conseguenza, fino ad epoche recenti, nella maggioranza dei trasporti su rotaia si sono adottati, per il distanziamento dei veicoli, sistemi di blocco fisso.

#### 1.4.1 SISTEMI DI BLOCCO FISSO

Il blocco fisso è caratterizzato da:

- una linea che è suddivisa in sezioni di blocco;
- le sezioni di blocco possono essere impegnate da un solo treno;
- lo stato di "Train Detection" libero/occupato della sezione è determinato dai dispositivi installati lungo il binario (essenzialmente circuiti di binario, conta assi). Lo stato di occupazione da parte del treno di una qualche parte della sezione è rilevato direttamente dall'Interlocking grazie a dispositivi installati sul binario;
- le informazioni di Train Detection sono rilevate direttamente dal sistema di terra;
- in funzione delle condizioni del segnalamento vengono costruite le informazioni di marcia o genericamente Autorizzazioni al Movimento (MA) necessarie al treno che segue per muoversi in sicurezza.

I Sistemi di Distanziamento a blocco fisso possono essere, inoltre, suddivisi in sistemi di tipo continuo o discontinuo:

- **Continuo:** la velocità consentita nella sezione di blocco in cui il veicolo sta entrando è trasmessa in modo continuo attraverso circuiti di binario a correnti codificate oppure attraverso onde radio. Il vantaggio sostanziale di una trasmissione continua consiste nel fatto che ciascun veicolo può regolare la marcia in base ad una informazione sulla posizione del leader aggiornata in tempo reale a meno di ritardi di trasmissione. Infatti, come mostrato nella seguente figura, non appena il veicolo leader libera la sezione di blocco 3, il follower può riprendere ad accelerare senza completare la manovra di arresto iniziata.

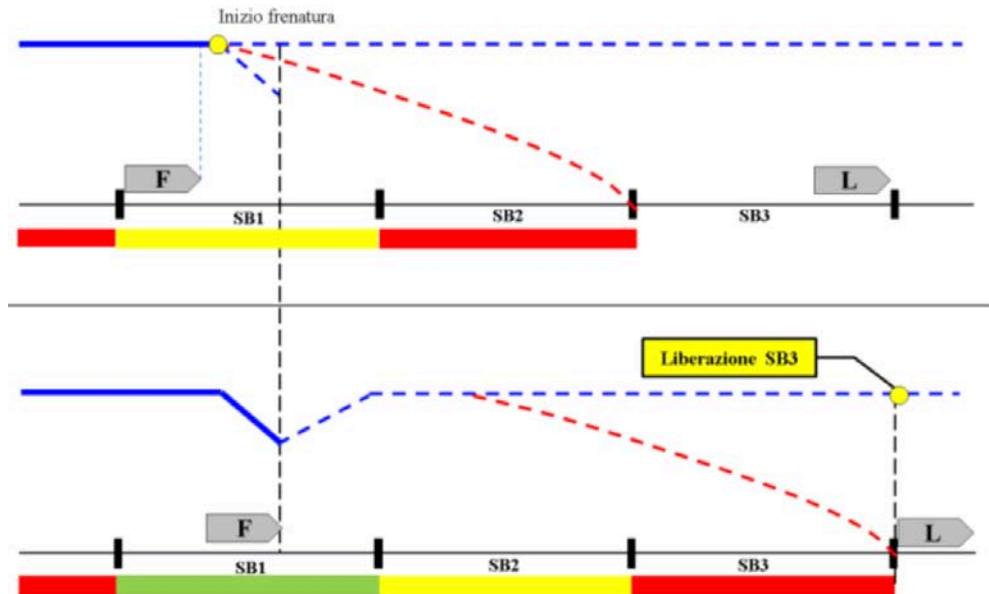


Figura 7 - Distanziamento con blocco fisso e trasmissione continua

- Discontinuo:** la velocità consentita nella sezione di blocco in cui il veicolo sta entrando viene trasmessa solo in alcuni punti della linea dove sono posizionati i segnali luminosi. Se la linea è dotata di ripetizione in cabina del segnale, vi sono dispositivi chiamati “boe commutative” (dispositivi in grado di inviare a bordo una stringa di bit: fino a 1023) che sono installati tra le rotaie e trasmettono al veicolo in transito l’aspetto del segnale luminoso a cui sono collegati.

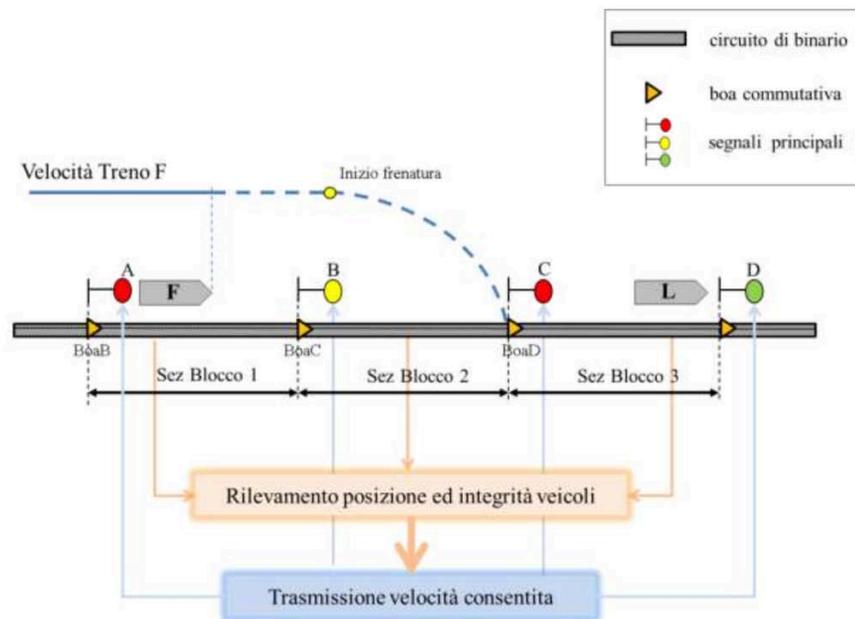
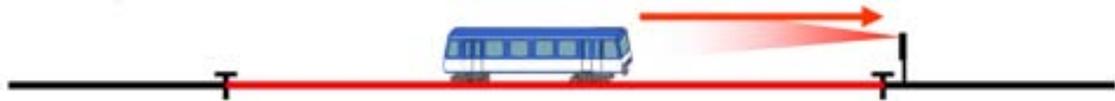


Figura 8 - Distanziamento con blocco fisso e trasmissione discontinua

Con i sistemi di blocco fisso si suddivide la linea in sezioni di blocco e sono possibili due regimi di circolazione: regime del giunto e regime del consenso. Con il **regime del giunto** la sezione di blocco risulta “libera” non appena l’ultimo treno che l’ha percorsa ha finito di occuparla, mentre con il **regime del consenso** la sezione di blocco risulta sempre “bloccata”, cioè non disponibile, ed è necessario richiedere espressamente di “liberarla” per avere la possibilità di percorrerla. Tale autorizzazione è detta *Movement Authority* (MA). Il regime del consenso garantisce una maggiore sicurezza ed è quello maggiormente impiegato nei trasporti su rotaia. L’Autorizzazione al Movimento nei sistemi di blocco fisso viene fornita al sistema di bordo essenzialmente utilizzando specifici codici o telegrammi. I dispositivi che consentono l’invio a bordo dei dati sono posti lungo il binario (essenzialmente circuiti di binario codificati, balise o punti informativi) o nei sistemi più recenti tramite radio.



**Figura 9 - Sistema di blocco fisso**

L’autorizzazione al movimento fornita al treno non può mai estendersi oltre il successivo segnale disposto a via impedita o la successiva sezione occupata.

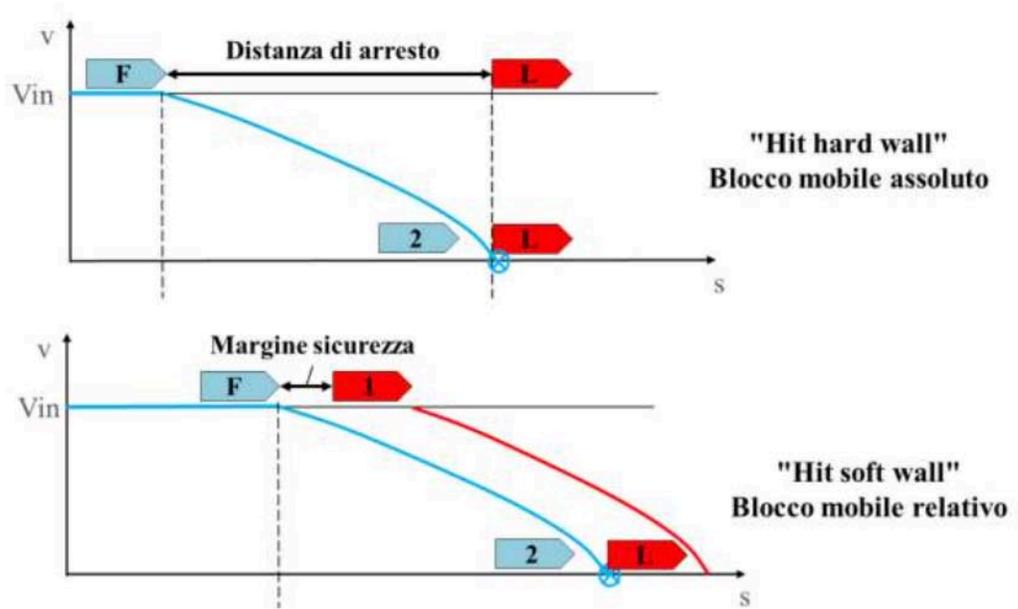
#### **1.4.2 SISTEMI DI BLOCCO MOBILE**

Il blocco mobile è caratterizzato da:

- treni che si inseguono conoscendo la propria posizione (Train Location) e la posizione della coda del treno che precede. In queste applicazioni i sistemi di bordo sono molto evoluti poiché sono in grado di individuare la posizione del treno su un percorso conosciuto.
- L’informazione di Train Location viene inviata dal treno ai sistemi di controllo del distanziamento di terra i quali conoscendo le condizioni della via e la posizione dei treni sono in grado di inviare a ciascun treno la propria autorizzazione.

Sistemi di distanziamento a blocco mobile possono essere, inoltre, suddivisi in sistemi di tipo assoluto o relativo:

- **blocco mobile assoluto (cd. hard wall moving block):** la distanza minima di sicurezza tra un veicolo leader e un veicolo follower è calcolata supponendo che in un generico istante il leader si fermi esattamente dove si trova in quell’istante; ciò significa che il follower deve trovarsi ad una distanza di sicurezza dal leader pari almeno alla distanza di arresto per evitare la collisione.
- **Blocco mobile relativo (cd. soft wall moving block):** la distanza minima di sicurezza tra un veicolo leader e un veicolo follower è calcolata supponendo che in un generico istante il leader inizi a frenare fino all’arresto completo e che il follower a sua volta reagisca con una frenatura dopo un certo ritardo. Ciò significa che al limite la distanza di sicurezza debba essere pari almeno alla distanza percorsa durante il ritardo di reazione.

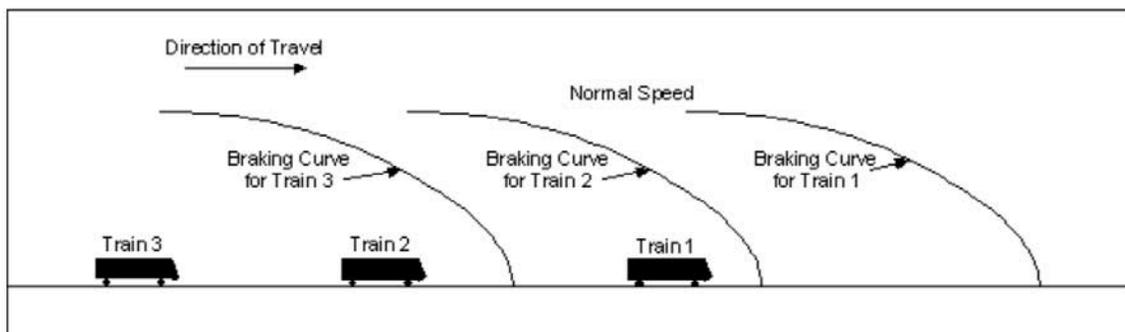


**Figura 10 - Tipo di blocco mobile**

Le attuali tecnologie disponibili consentono di realizzare solo il blocco mobile assoluto, ma la ricerca di settore è già proiettata verso il blocco mobile relativo.

L'approccio soft wall assume che se due veicoli successivi viaggiano alla stessa velocità il veicolo follower può viaggiare ad una distanza dalla coda del leader pari solo ad un margine di sicurezza; infatti, se il veicolo leader inizia a frenare il follower ha a disposizione anche la distanza percorsa dal leader in frenatura per frenare a sua volta. Sebbene gli innumerevoli incidenti autostradali smentiscano clamorosamente che questa logica sia sicura a causa dell'aleatorietà dell'effettivo valore della distanza di arresto (condizionata soprattutto dal comportamento umano), la guida automatizzata che è possibile realizzare nel trasporto ferroviario potrebbe rendere sicura anche questa logica di distanziamento.

Come mostrato nella seguente figura, fino a quando ciascun convoglio marcia alla stessa velocità di quello che lo precede e tutti i veicoli hanno le stesse prestazioni in frenatura, è possibile attuare un distanziamento spaziale di equilibrio pari ad un margine sicurezza.



**Figura 11 - Distanziamento minimo con blocco mobile relativo**

Gli effetti sulla capacità di linea di un distanziamento a blocco mobile relativo non sono stati ancora indagati in quanto il vincolo tecnologico rende non sicura la circolazione già con blocco mobile assoluto. Tuttavia, è sicuramente possibile affermare che il passaggio al blocco mobile (sia esso assoluto o relativo) comporterà una sostanziale riduzione dei costi di gestione dell'infrastruttura. Il segnalamento sulle linee ferroviarie tradizionali presuppone, infatti, un ammontare enorme di dispositivi che necessitano di energia di alimentazione e manutenzione costante, in quanto esposti alle variazioni delle condizioni climatiche, all'usura, agli atti di vandalismo ed ai guasti fisiologici. A causa della loro installazione lungo la linea, la manutenzione è, quindi, molto costosa e spesso possibile solo quando i convogli non circolano. Inoltre, i guasti sono difficili da individuare e localizzare. Sulle linee metropolitane, inoltre, l'accesso ai binari è difficoltoso sia nei tratti sotterranei che in quelli sopraelevati.

Per questi ed altri motivi, uno degli obiettivi primari delle aziende trasportistiche è da sempre quello di ridurre al minimo l'attrezzatura di segnalamento. Ridurre i dispositivi consente, inoltre, di contenere anche i costi di installazione.

Le tecnologie necessarie a realizzare il blocco mobile necessitano innanzitutto di minori strumenti di segnalazione e quelli ancora necessari non richiedono energia di alimentazione; un esempio sono le cosiddette boe fisse, cioè quelle boe usate solo per la correzione degli errori odometrici, che si attivano solo al passaggio del convoglio ferroviario.

L'approccio a blocco mobile assoluto prevede che la distanza minima di sicurezza tra due veicoli successivi sia pari a:

$$S_d = R_d + SBMD$$

dove:

- $R_d$  è la distanza percorsa durante i tempi di reazione del sottosistema di terra (frequenza di trasmissione delle informazioni dal treno leader al treno follower), del sottosistema di bordo (tempi di reazione dell'apparato frenante e del computer di bordo);
- SBMD è la distanza di arresto calcolata con full braking service deceleration cioè con la massima decelerazione di servizio.

Pertanto, il blocco mobile assoluto garantisce che a valle di ciascun veicolo vi sia una distanza libera pari almeno alla distanza di arresto di servizio.

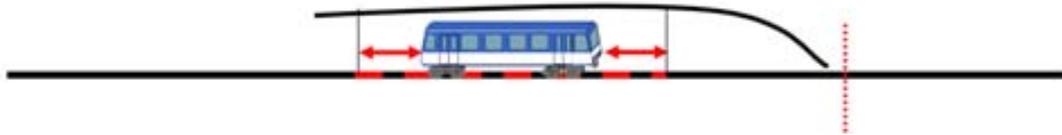
L'approccio a blocco mobile relativo prevede, invece, che la distanza minima di sicurezza tra due veicoli successivi sia pari a:

$$S_d = R_d + BMD_{\text{leader}} - BMD_{\text{follower}}$$

dove  $BMD_{\text{Leader}}$  è la distanza di arresto del veicolo leader e  $BMD_{\text{Follower}}$  quella del follower.

Gli aspetti critici di tale approccio che originano ancora molto scetticismo sulla adozione di tale blocco su reti reali consistono nel rischio relativo all'eventualità che il leader subisca un incidente arrestandosi senza quasi percorrere spazio (ad esempio un deragliamento di un convoglio sul binario di corsa di verso opposto) o che decelerati con un tasso inaspettato.

L'Autorizzazione al Movimento nei sistemi di blocco mobile viene fornita al sistema di bordo utilizzando specifici codici o telegrammi. Generalmente il blocco mobile utilizza onde radio per inviare a bordo l'informazione e la comunicazione è bidirezionale.



**Figura 12 - Sistema di blocco mobile**

L'autorizzazione al movimento non deve estendersi oltre il prossimo punto non superabile di linea. Questo può essere fisso in corrispondenza di un segnale disposto a via impedita, oppure mobile se si tratta della coda di un treno che precede.

### 1.4.3 SUDDIVISIONE DEI SISTEMI DI BLOCCO

La verifica delle condizioni di libertà della linea e le autorizzazioni ad utilizzarla possono essere effettuate in modi diversi e a diversi livelli di automazione del sistema. I sistemi di blocco si dividono in due macrocategorie:

- **Sistemi di blocco a comando o concorso manuale:**

Il **Blocco Telefonico** che è ancora utilizzato nelle linee gestite a dirigenza locale nel caso in cui il blocco elettrico risulti guasto e in alcuni tratti di linee nel Sud Italia.

Il distanziamento dei treni avviene mediante dispacci telefonici registrati di "via libera" scambiati esclusivamente da agenti con funzioni di Dirigente Movimento (DM) delle stazioni limitrofe e pertanto i treni vengono distanziati solo fra stazioni abilitate.

Nelle linee attrezzate con sistemi di blocco elettrico (come ad esempio il blocco elettrico automatico che normalmente permette l'esistenza di più treni fra due stazioni abilitate in quanto la tratta viene divisa in sezioni di blocco) l'attivazione del blocco telefonico in sostituzione di quello elettrico (in casi di guasto) comporta che la tratta diventi una "unica sezione", cioè fra le due stazioni abilitate può circolare un solo treno alla volta, con ovvi ritardi nella circolazione.



**Figura 13 - Blocco telefonico**

Un esempio di cronaca, purtroppo attuale, della fallibilità del blocco telefonico è quello verificatosi sulla linea Bari-Nord, che collega il capoluogo pugliese alla città di Barletta ; alle 11.30 del 12 luglio 2016, infatti, due treni pendolari, in viaggio sulla tratta a binario unico tra Ruvo e Corato, vicino Andria, si sono scontrati frontalmente. Le vittime ufficiali sono state 23 con una cinquantina di feriti.



**Figura 14 - Incidente del 12 luglio sulla linea pugliese**

Secondo Stefania Gnesi, ricercatrice dell'Istituto di scienza e tecnologie dell'informazione del Consiglio nazionale delle ricerche (Isti-Cnr), la causa dovrebbe essere stata la mancanza di sistemi automatici di supervisione della linea ferroviaria, dato che in quella tratta viene ancora usato il cosiddetto "blocco telefonico".

Il **Blocco Elettrico Manuale** prevede che sia presente un operatore, DM o Guardablocco, in ogni posto di blocco; l'impianto di blocco elettrico manuale assiste l'operatore consentendogli di svolgere solo manovre che non presentino errori di disattenzione o dimenticanza.

Considerando due stazioni successive e le fasi da svolgere per la circolazione in sicurezza, con il blocco elettrico manuale lo scambio di informazioni tra le due stazioni avviene tramite un'apparecchiatura manovrata dall'operatore denominata strumento di blocco: in ogni posto di blocco è prevista l'installazione di un strumento di blocco, numerato, collegato ad un altro strumento di blocco, installato nel posto di blocco adiacente.



**Figura 15 - Istrumento di blocco**

Il blocco elettrico manuale attua un regime di circolazione chiuso, cioè la linea è considerata normalmente occupata; solo quando è stato richiesto ed ottenuto il consenso, una sezione è considerata libera.

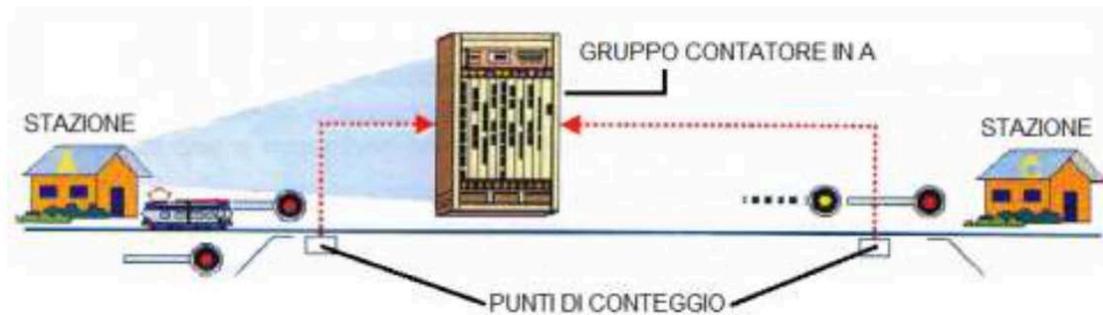
- **Sistemi di blocco automatico:**

Il **Blocco Conta Assi**, al contrario del blocco elettrico manuale, non necessita dell'intervento umano. Questo blocco prevede, infatti, un impianto che autonomamente svolga sia la funzione di accertamento della via libera che quella di accertamento della completezza del convoglio.

La fase principale che consente di garantire la circolazione dei convogli su una stessa tratta di linea in sicurezza è senza dubbio quella inerente l'accertamento della via libera: la sezione di blocco può essere occupata da un treno solo dopo che è stata liberata dal treno precedente; la completezza di un convoglio partito da una stazione e giunto in un successivo posto di blocco garantisce che non vi siano veicoli del convoglio fermi lungo la tratta di linea.

Considerando un'unica sezione di blocco delimitata da due stazioni, un impianto di blocco conta assi prevede per ogni binario:

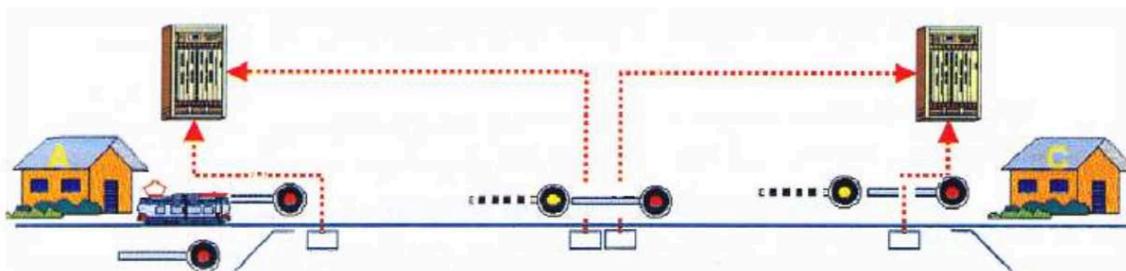
- due punti di conteggio, ubicati ai due estremi della sezione;
- un gruppo contatore, montato in una delle due stazioni estreme.



**Figura 16 - Blocco conta assi**

I punti di conteggio sono dei dispositivi (pedali) che inviano sia un segnale di controllo continuo per informare del corretto funzionamento dell'impianto (l'interruzione di tale segnale fa scattare automaticamente il segnale di blocco a via impedita) che un impulso al passaggio di ogni ruota del convoglio. I punti di conteggio sono in grado di contare gli assi di un convoglio in entrambi i sensi di marcia e funzionano anche nel caso di conteggio simultaneo nei due sensi di marcia. Il gruppo contatore riceve gli impulsi trasmessi dai due pedali, lontano e vicino, li conta e confronta il numero di impulsi trasmessi dal pedale lontano con quello degli impulsi trasmessi dal pedale vicino: se la differenza è nulla, la sezione di blocco è libera.

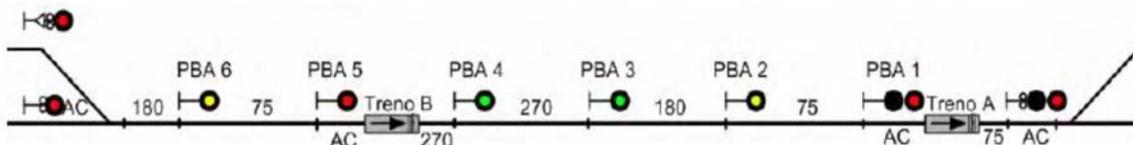
Se la tratta tra due stazioni A e C viene suddivisa in due sezioni di blocco per aumentare la potenzialità della linea, sono realizzati dei posti di blocco intermedi che, in questo caso però, sono impresenziati non essendo necessario né l'intervento diretto sull'apparecchiatura, né l'accertamento della coda del treno. Ogni posto di blocco intermedio prevede due pedali: uno collegato al gruppo contatore della stazione A ed uno collegato al gruppo contatore della stazione C.



**Figura 17 - Blocco conta assi con posto di blocco intermedio**

Il blocco conta assi attua un regime di circolazione aperto, infatti, le sezioni sono normalmente poste a via libera e vengono occupate solo quando effettivamente vi transita un convoglio.

Il **Blocco Elettrico Automatico a Correnti Codificate** è un sistema di blocco che permette di ottenere capacità di linea elevate. A tale scopo è necessario suddividere ciascuna tratta, compresa tra due località di servizio limitrofe, nel maggior numero possibile di sezioni di blocco, con l'obiettivo di conseguire il distanziamento minimo fra treni successivi, in relazione alla velocità massima prevista sulla linea. La lunghezza delle sezioni deve, quindi, essere tale da garantire lo spazio di frenatura. Per linee con velocità maggiori di 120 Km/h tale lunghezza è di norma di 1350 m, mentre, per velocità inferiori, caso peraltro abbastanza raro su linee attrezzate con blocco automatico, scende a 1150 m.

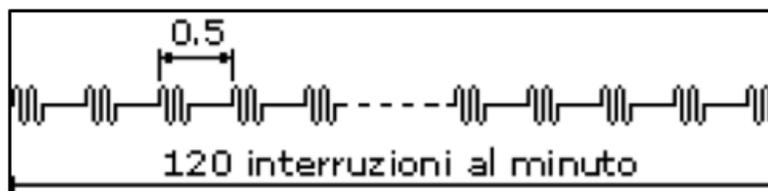


**Figura 18 - Blocco Elettrico Automatico a Correnti Codificate**

Il funzionamento del blocco elettrico automatico a correnti codificate sfrutta l'impiego di *circuiti di binario*<sup>4</sup>; ognuno di questi CdB coincide normalmente con una sezione di blocco ed è utilizzato per rilevare la presenza o meno di un treno.

L'alimentazione di questi Cdb avviene in corrente alternata a frequenza di 50 Hz, codificata mediante una successione di ON - OFF della medesima durata. Dall'estensione del periodo di queste interruzioni, scaturiscono i quattro codici normalmente utilizzati in RFI:

- 75
- 120
- 180
- 270



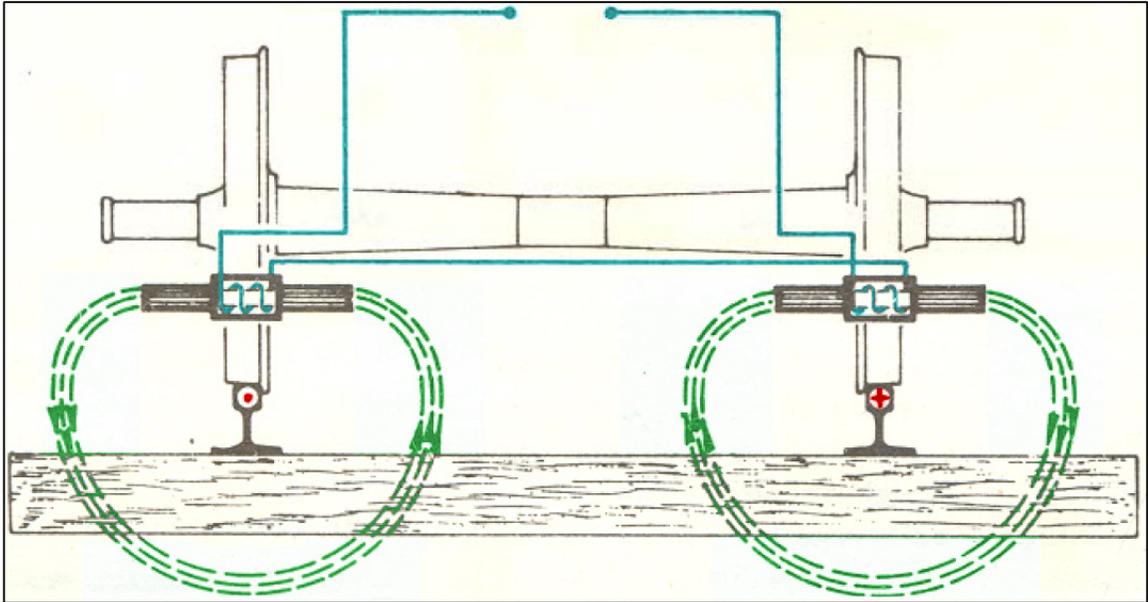
**Figura 19 - Esempio di interruzioni al minuto**

Ad ognuno di questi codici è associato un aspetto del segnale luminoso e quindi il sistema fornisce al macchinista l'informazione sull'aspetto dei **segnali** posti a valle della **sezione** percorsa dal treno.

La ripetizione dei segnali a bordo dei locomotori si realizza mediante l'accoppiamento induttivo tra il flusso magnetico, prodotto dalla corrente codificata che circola nelle due rotaie e si richiude attraverso gli assi del treno, e due bobine (captatori) collegate in serie tra loro, poste trasversalmente al binario a circa 20 cm di altezza dal piano di rotolamento delle rotaie, davanti al primo asse. Per induzione elettromagnetica nei captatori viene così a formarsi una corrente elettrica che è l'immagine esatta del codice. Il codice così derivato viene inviato all'apparato di bordo che elabora l'informazione e agisce in maniera automatica sul sistema di trazione o visualizza il codice sul cruscotto in cabina di guida. Perché

<sup>4</sup> Circuito di binario verrà successivamente approfondito nel capitolo 1.2.2.4

questo accoppiamento si possa stabilire, è indispensabile che l'alimentazione dei CdB avvenga sempre contro treno.



**Figura 20** - Captazione delle correnti codificate: **correnti del CdB**, **Campo magnetico indotto dalle correnti del CdB** e **circuito di captazione**.

Un caso particolare di blocco elettrico automatico a correnti codificate è quello della direttissima Firenze-Roma. In questa tratta, con velocità superiori a 180 km/h e fino a 250 km/h, è necessario aumentare le informazioni disponibili poiché occorrono maggiori spazi di frenatura. Viene aggiunta così una seconda portante di corrente a 178 Hz che codifica con i medesimi criteri della 50 Hz. In questo modo si passa da un sistema a 4 codici, ad un sistema a 9 codici.

		Frequenza base (50 Hz)				
		A.C.	cod.75	cod.120	cod.180	cod.270
Frequenza Aggiunta (178 Hz)	A.C.	x	75	120	180	270
	cod.75	x	x	120/1	180/1	270/1
	cod.120	x	x	x	x	270/2
	cod.180	x	x	120/2	x	x
	cod.270	x	x	x	x	x

**Figura 21** - Sistema a 9 codici

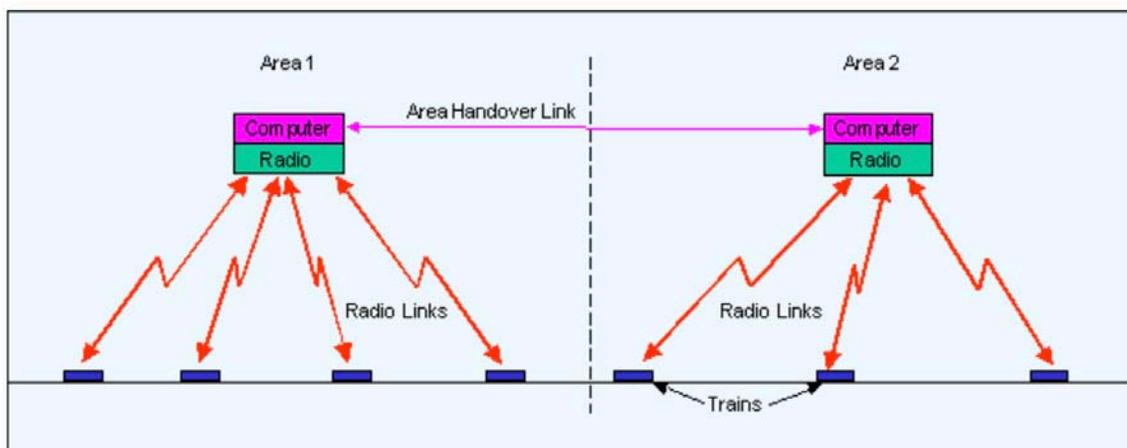
Qualora un treno attrezzato per la captazione a 4 codici dovesse circolare sulla linea attrezzata a 9 codici, potrebbe comunque procedere nella sua marcia sulla base dei soli codici derivati dalla frequenza base a 50 Hz.

<i>Codice</i>	<i>Significato</i>	<i>codice captato da treni attrezzati per 4 codici</i>
270/2	Via libera senza restrizioni	270
270/1	Segnale ad aspetto restrittivo posto a 5400 m	270
270	Segnale ad aspetto restrittivo posto a 4050 m	270
180/1	Preavviso di via libera per un percorso deviato a velocità non superiore a 130 o 100 km/h o riduzione di velocità a 150 km/h per lavori su binario adiacente	180
180	Preavviso di via impedita a distanza non inferiore a 2700 m o via libera per percorso deviato a velocità non superiore a 30 o 60 km/h ovvero generica riduzione di velocità	180
120/2	Avviso di itinerario deviato da percorrersi a 130 km/h posto a distanza non inferiore a 1350 m	120
120/1	Avviso di itinerario deviato da percorrersi a 100 km/h posto a distanza non inferiore a 1350 m	120
120	Avviso di itinerario deviato da percorrersi a 30 o 60 km/h posto a distanza non inferiore a 1350 m	120
75	Avviso di via impedita	75
AC	Sezione impegnata	AC

**Figura 22 - Significato di ciascuno dei 9 codici**

Il **Blocco Radio** utilizza la trasmissione a mezzo di onde radio ed è, ormai, già ampiamente adottata sia sulle linee AV che sulle linee metropolitane. Questa tecnologia consente lo scambio via onde radio delle informazioni tra linea e bordo; in questo modo ogni veicolo dispone di informazioni in modo continuo nel tempo e nello spazio e ciò consente di adattare il posizionamento e la lunghezza delle sezioni di blocco in funzione della posizione, della velocità e delle prestazioni frenanti del veicolo peggiore transitante in linea.

Su una linea attrezzata con blocco mobile sono definite delle aree e la circolazione in ciascuna area è gestita da un computer (detto zone controller o Radio Block Center) che comunica con i veicoli in transito nella propria area attraverso il sistema di trasmissione radio.



**Figura 23 - Blocco mobile e Trasmissione Radio**

Ciascun convoglio trasmette al computer dell'area che sta attraversando il proprio codice identificativo, la posizione, direzione e velocità. Il computer processa tali informazioni, le elabora e le ritrasmette con le dovute valutazioni.

Il collegamento radio tra ciascun convoglio ed il computer controllore di area è continuo nel tempo, a meno che non si verificano ritardi di elaborazione e trasmissione dati, cosicché il computer conosce istante per istante la posizione di ogni convoglio nella sua area. Il blocco mobile con trasmissione radio è indicato come Communications Based Train Control (CBTC).

Esistono già alcune linee attrezzate con CBTC che, tuttavia, applicano ancora il distanziamento a blocco mobile assoluto. Infatti, la gestione del traffico ferroviario su tali linee prevede che i convogli siano sempre tutti ad una distanza pari almeno a quella di arresto calcolata a partire dalla velocità massima di linea e con le prestazioni frenanti del veicolo peggiore. In tal modo in caso di interruzione delle trasmissioni radio prolungata oltre un certo valore limite viene comandata la frenatura di emergenza e ciascun treno dispone della distanza necessaria ad arrestarsi senza collisione.

Per consentire a ciascun treno di comunicare al controllore di area la propria posizione corretta sono posizionate delle boe, ad intervalli regolari lungo il tracciato, che permettono di correggere la posizione e la velocità del treno, calcolate dal computer tramite il sistema odometrico.

Per gestire la transizione da un'area a quella successiva, i computer controllori di aree adiacenti sono, a loro volta, in comunicazione radio: come mostrato nella seguente figura, prima che un veicolo entri in un'area successiva viene già annunciato dal computer dell'area 1 al computer dell'area 2. Inoltre, il computer dell'area 1 comunica al treno di cambiare il proprio codice radio con quello della nuova area approssciata. Quando il computer della nuova area rileva il codice identificativo del treno ne acquisisce le relative informazioni dalla prima area ed il trasferimento è completato.

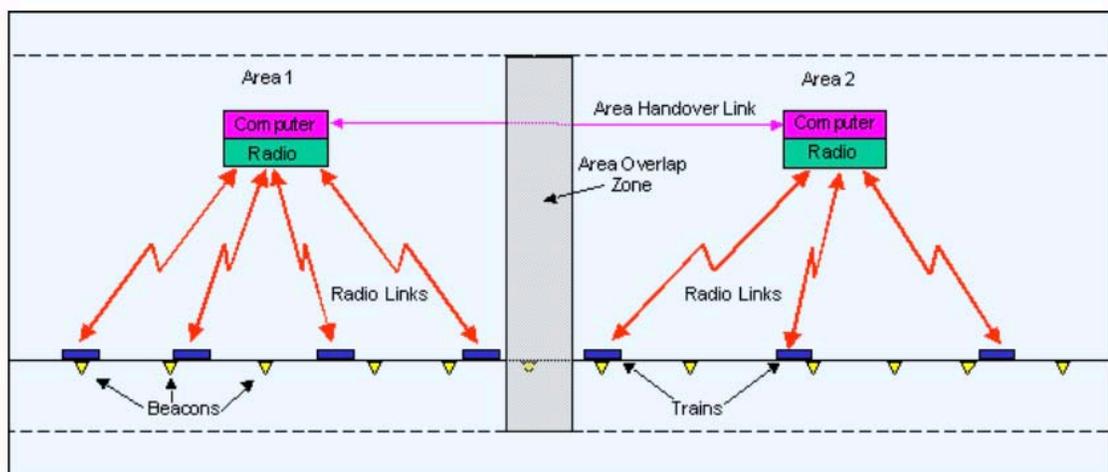


Figura 24 - Transizione tra aree controllate nel CBTC

#### 1.4.4 CIRCUITI DI BINARIO

I circuiti di binario (CdB) sono dispositivi che stanno al centro dei sistemi di blocco fisso automatico, poiché spesso sono integrati anche in sistemi di blocco radio, e quindi rivestono una grande importanza negli impianti di segnalazione.

I CdB sono circuiti elettrici realizzati utilizzando come conduttori le rotaie di una sezione di blocco collegandole ad una sorgente di forza elettromotrice a bassa tensione (25÷50 V), da un capo della sezione di blocco, e chiudendo il circuito, dall'altro capo, con uno strumento di misura. Quando il tratto è libero la corrente elettrica generata dall'alimentatore è la stessa di quella registrata dallo strumento di misura, a meno delle perdite di linea. Quando invece un veicolo occupa il binario con un asse (o *Sala*) cortocircuita le due rotaie e quindi lo strumento di misura registra una corrente diversa da quella generata dall'alimentatore.

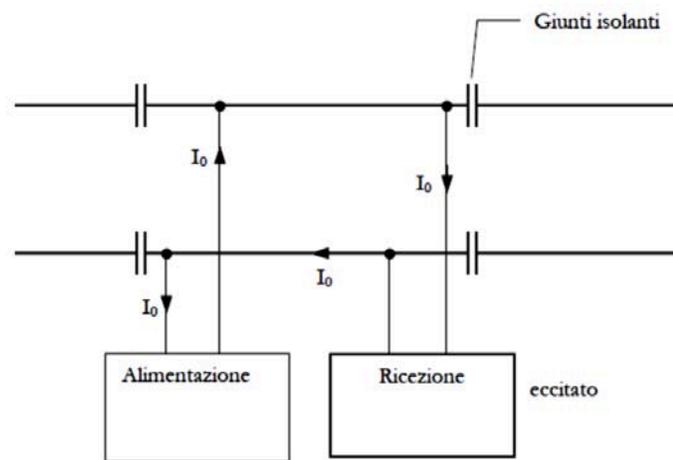


Figura 25 - Circuito di binario con sezione di blocco libera

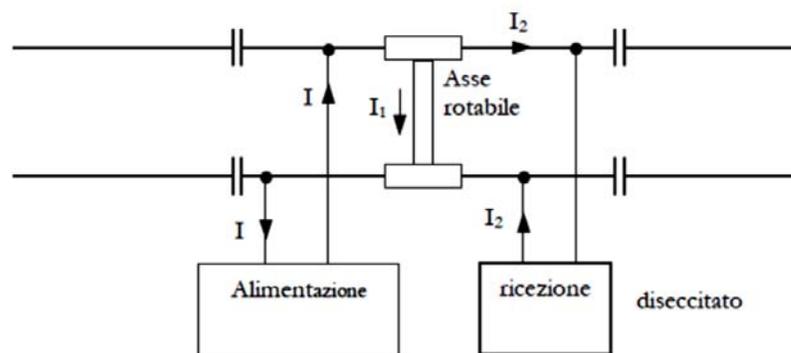


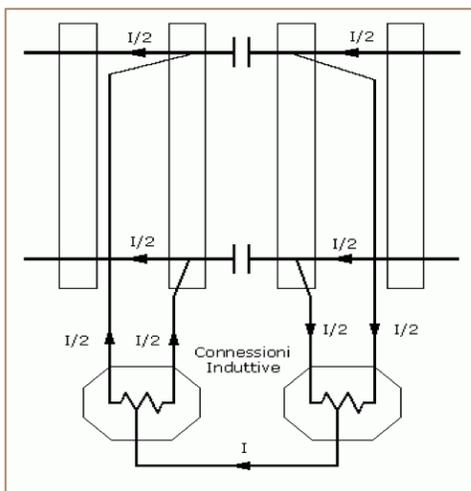
Figura 26 - Circuiti di binario con sezione di blocco libera

Per il corretto funzionamento del sistema è necessario che i due tratti di rotaia della sezione di blocco siano isolati elettricamente da quelli della sezione di blocco successiva e precedente. Le rotaie sono però

usate come conduttori del sistema elettrico di trazione. Dato che tra una sotto stazione elettrica (SSE) e l'altra vi sono molteplici sezioni di blocco, gli aspetti di segnalamento e alimentazione entrano in contrapposizione: c'è la necessità da un lato di isolare tratti di binario e dall'altro di conduzione elettrica lungo tutto il binario.

Nei sistemi di trazione con alimentazione in corrente continua, per avere continuità di collegamento elettrico con i binari sezionati, si attuano delle connessioni induttive tra le sezioni di blocco adiacenti e i circuiti di binario sono eserciti in corrente alternata a frequenza di 50Hz. Le connessioni induttive sono costituite da un avvolgimento di spire di alluminio di grossa sezione disposte su di un nucleo magnetico. Le connessioni così realizzate offrono bassa resistenza ohmica al passaggio della corrente continua della trazione, ma allo stesso tempo presentano un'elevata impedenza alla corrente alternata del circuito di binario, che risulta così isolato dal circuito adiacente.

Nei sistemi con alimentazione in corrente alternata è necessario esercire i circuiti di binario a frequenza diversa da quella di alimentazione e, in genere, si scelgono frequenze tra i 91Hz e i 10kHz.



**Figura 27 - Connessioni induttive tra le sezioni di blocco adiacenti**

I circuiti di binario possono avere varie funzioni:

- di stazionamento: sono posti nei binari di stazionamento (ovvero di normale fermata) delle stazioni per indicare la presenza o meno di uno o più veicoli su di essi;
- di occupazione: di solito posti subito dopo un segnale, servono per "occupare" ovvero disporre automaticamente a via impedita il segnale dopo il passaggio del treno in modo che non possa essere utilizzato da un treno successivo;
- di liberazione: servono, una volta che il treno li ha "liberati", per effettuare la liberazione automatica di un passaggio a livello o di altri enti;
- indicativi: servono solo per segnalare la presenza di un treno in quella sezione di binario.

Ovviamente un CdB può avere una o più delle funzioni suddette.

## 2. CAPACITA'

La **capacità C** rappresenta il carico massimo sopportabile da un ramo di una linea ed è definita come “numero massimo di treni che possono transitare in un punto generico del ramo nell’unità di tempo”. Non è possibile assegnare un valore assoluto di capacità ad una linea ferroviaria, bensì una pluralità di valori dipendenti da alcuni variabili <sup>5</sup>.

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 <sup>6</sup>. Il valore così determinato rappresenta 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 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.

### 2.1 CAPACITÀ TEORICA

Bisogna introdurre le seguenti ipotesi per calcolare la capacità teorica:

- Omogeneità del flusso: i treni hanno tutti le stesse caratteristiche in termini di lunghezza e accelerazione/decelerazione;
- 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;
- 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;

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

$$q = \frac{1}{\Delta T} = \frac{v}{\delta}$$

---

<sup>5</sup> UIC 406: *Capacity as such does not exist. Railway infrastructure capacity depends on the way it is utilised.*

<sup>6</sup> Treni della stessa categoria, con stesse velocità e con il minimo distanziamento possibile.

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

dove:

- $\Delta T$  = distanziamento temporale tra due treni consecutivi
- $v$  = velocità del treno che segue
- $\delta$  = distanziamento spaziale tra due treni consecutivi
- $T_{\min}$  = distanziamento temporale 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
- $\delta_{\min}$  = distanziamento spaziale minimo tra due treni consecutivi

Nei capitoli successivi si presenteranno i valori di capacità nel caso di blocco mobile e di blocco fisso, e si proporrà un confronto tra i due sistemi di circolazione in base ai risultati ottenuti.

### 2.1.1 BLOCCO MOBILE – CAPACITA' TEORICA

Il blocco mobile<sup>7</sup> prevede che il distanziamento minimo tra due treni successivi sia funzione dello spazio di frenatura, variabile istante per istante, e sia calcolato in base alla velocità di circolazione dei treni e del loro sistema frenante. Al contrario del blocco fisso, quindi, non è basato sulla suddivisione della linea in sezioni di blocco di lunghezza prefissata.

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

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

In prima approssimazione lo spazio di frenatura può essere considerato funzione della velocità  $v$  a cui inizia la frenatura e della decelerazione  $\gamma$ , ipotizzata costante, del convoglio, secondo la formula:

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

Per ottenere il flusso corrispondente al distanziamento spaziale minimo si devono introdurre nell'espressione generale del flusso  $q = v/\delta$  i valori precedentemente citati:

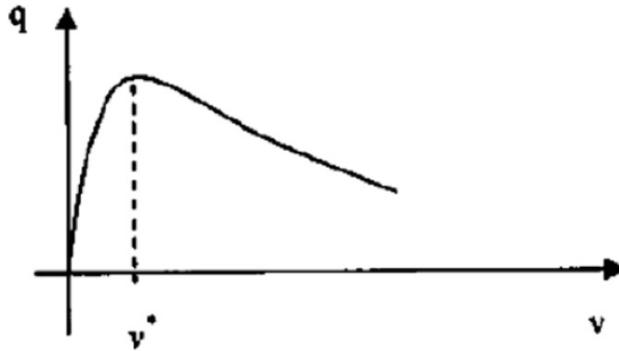
$$q = \frac{v}{\delta_{\min}} = \frac{v}{\frac{kv^2}{2\gamma} + L + f} \quad \text{con } L, f > 0 \text{ e } v \geq 0$$

Dove  $k$  è un coefficiente che tiene conto della parte variabile del margine di sicurezza  $f$ .

---

<sup>7</sup> Come spiegato nel capitolo 1.4.2

La funzione  $q = q(v)$  è definita curva di deflusso q-v; questa curva, che può essere anche indicata come curva di Lehner, viene rappresentata graficamente nel seguente modo:



**Figura 28 - Curva di deflusso q-v**

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 ricavata annullando la derivata prima della funzione  $q(v)$ . Tale valore è pari a:

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

Sostituendo tale valore nell'espressione della capacità teorica otteniamo:

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

In altre parole, all'aumentare della decelerazione e quindi del sistema frenante del convoglio, la velocità critica e la capacità aumentano, mentre all'aumentare della lunghezza del treno la velocità critica aumenta, a discapito della capacità che diminuisce.

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  $\delta_{\min}$ )<sup>8</sup>.

Sono presentati, ora, alcuni esempi relativi alle variazioni dei valori di velocità critica e di capacità teorica, al variare dei parametri da cui dipendono ( $\gamma$ , L):

**Tabella 6 - esempi di capacità e velocità critica**

Tipologie di treno	Parametri cinetici	Velocità critica	Capacità teorica
Caso 1: - metropolitana	$\gamma = 0.7 \text{ m/s}^2$ L = 120 m f = 20 m k= 1.1	$v^* = 48 \text{ km/h}$	C = 172 treni/h
Caso 2: - treno metropolitano	$\gamma = 0.6 \text{ m/s}^2$ L = 250 m f = 20 m k= 1.1	$v^* = 62 \text{ km/h}$	C = 114 treni/h
Caso 3: - treno passeggeri	$\gamma = 0.5 \text{ m/s}^2$ L = 400 m f = 20 m k= 1.1	$v^* = 70 \text{ km/h}$	C = 84 treni/h
Caso 4: - treno merci	$\gamma = 0.4 \text{ m/s}^2$ L = 500 m f = 20 m k= 1.1	$v^* = 70 \text{ km/h}$	C = 67 treni/h
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

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  $\gamma$  si compensano, senza provocare quindi alcuna variazione della velocità critica.

Se si fosse mantenuta 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

<sup>8</sup> Va ricordato che in questa trattazione si sta valutando la capacità di una linea ferroviaria in termini di mezzi: la capacità 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  $\sigma$ . 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.

modo più lieve, passando da 172 a 145 treni/h (riduzione del 16% anziché del 51%) nei primi tre casi.

**Tabella 7 - Capacità teorica al variare della decelerazione**

Caso 1: Metropolitana	$\gamma = 0.7 \text{ m/s}^2$ L = 120 m f = 20 m k= 1.1	$v^* = 48 \text{ km/h}$	C = 172 treni/h
Caso 2: - treno metropolitano	$\gamma = 0.6 \text{ m/s}^2$ L = 120 m f = 20 m k= 1.1	$v^* = 44 \text{ km/h}$	C = 158 treni/h
Caso 3: - treno passeggeri	$\gamma = 0.5 \text{ m/s}^2$ L = 120 m f = 20 m k= 1.1	$v^* = 41 \text{ km/h}$	C = 145 treni/h

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%).

**Tabella 8 - Capacità teorica al variare della lunghezza del treno**

Caso 1: Metropolitana	$\gamma = 0.7 \text{ m/s}^2$ L = 120 m f = 20 m k= 1.1	$v^* = 48 \text{ km/h}$	C = 172 treni/h
Caso 2: - treno metropolitano	$\gamma = 0.7 \text{ m/s}^2$ L = 250 m f = 20 m k= 1.1	$v^* = 66 \text{ km/h}$	C = 124 treni/h
Caso 3: - treno passeggeri	$\gamma = 0.7 \text{ m/s}^2$ L = 400 m f = 20 m k= 1.1	$v^* = 83 \text{ km/h}$	C = 99 treni/h

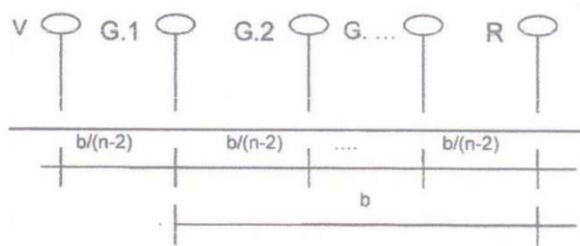
### 2.1.2 BLOCCO FISSO - CAPACITÀ TEORICA

Il blocco fisso, come già segnalato<sup>9</sup>, prevede che la linea venga suddivisa in sezioni di lunghezza prefissata e il distanziamento minimo tra due treni successivi sia funzione proprio di tale lunghezza. Il distanziamento minimo, nel caso di sezioni concatenate e segnali ad n aspetti, può essere espresso in forma generale come:

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

Dove:

- $f$  è il margine di sicurezza<sup>10</sup>
- $L$  è la lunghezza del treno
- $n$  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 valutata a partire dal primo segnale giallo, incontrato dal treno, fino al segnale rosso



**Figura 29 - Lunghezza della sezione b**

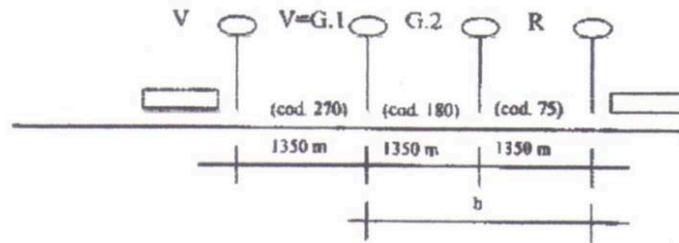
Se  $n - 2$  sono i segnali con luce gialla, allora la distanza  $b$  sarà suddivisa in  $n - 2$  sottosezioni ciascuna lunga  $b/(n - 2)$

Considerando sezioni con lunghezza pari a 1350m si riportano i seguenti esempi pratici:

Blocco automatico a correnti fisse	$n = 3$	$b = 1350\text{m}$
Blocco automatico a correnti codificate, a 4 codici	$n = 4$	$b = 2700\text{ m}$

<sup>9</sup> Vedi capitolo 1.4.1

<sup>10</sup> 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.



**Figura 30 - Esempio lunghezza della sezione b con blocco automatico a 4 codici**

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:

$$d \geq b \geq S_{\text{frenatura}}$$

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

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

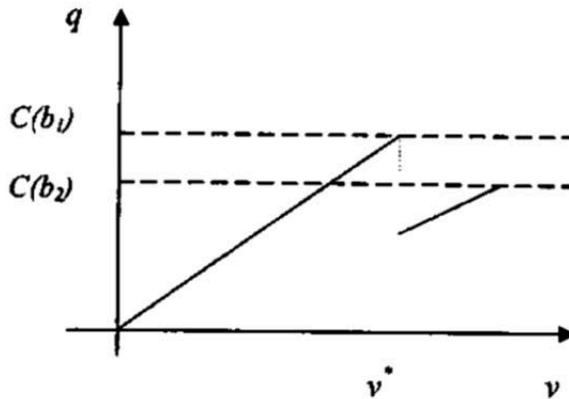
Al limite, per  $n \rightarrow \infty$  risulta che  $d = b$ .

Inserendo il valore calcolato nella formula generale  $q = v/\delta$  otteniamo che il valore del flusso, corrispondente al distanziamento minimo nel caso di blocco fisso, 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 fintantoché lo spazio di frenatura è minore della lunghezza della sezione b. Qualora  $S_{\text{frenatura}}$  fosse uguale a b si raggiungerebbe la capacità massima 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).



**Figura 31 - Curva di deflusso q-v nel caso di blocco fisso**

Dal grafico si evince che 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  $\gamma$  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:

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

(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, è dunque funzione della lunghezza  $b$  della sezione e del numero di aspetti dei segnali  $n$ .

### 2.1.3 CONFRONTO TRA BLOCCO MOBILE E BLOCCO FISSO

La curva di Lehner<sup>11</sup> rappresenta il limite massimo teorico delle curve di deflusso. Le rette del grafico q-v del blocco fisso, ottenute fissando il valore di b, saranno pertanto sempre contenute all'interno della curva di Lehner.

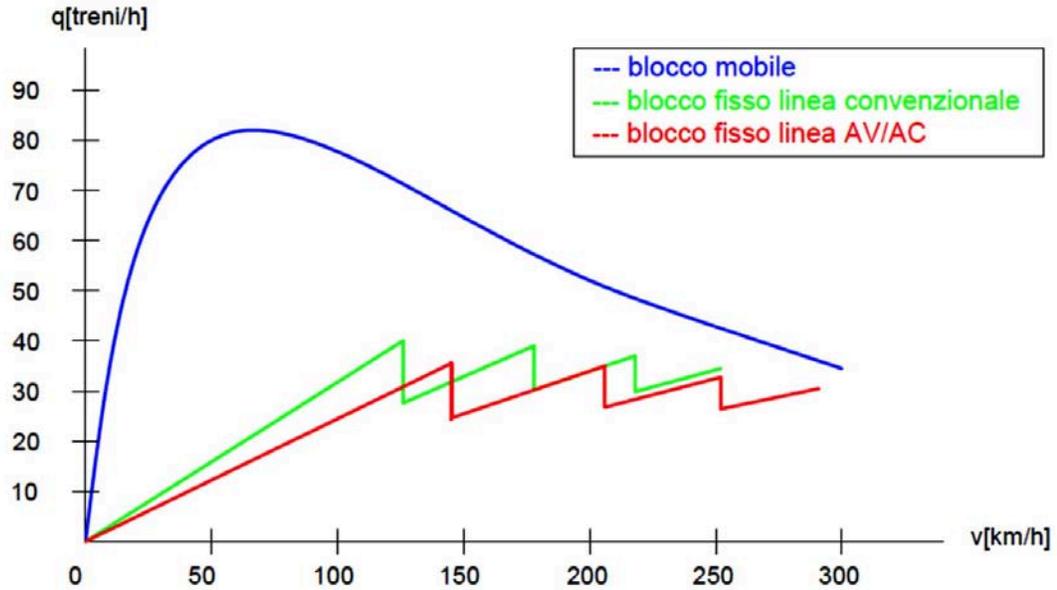


Figura 32 - Confronto blocco fisso e blocco mobile

In particolare, ponendo la lunghezza della sezione b pari alla distanza di arresto e considerando un numero di aspetti dei segnali che tende all'infinito<sup>12</sup>, la retta q-v del blocco fisso raggiungerà il suo massimo proprio in corrispondenza della curva di Lehner.

Tale affermazione può essere 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 corrisponde al flusso massimo per il blocco fisso), 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:

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

<sup>11</sup> Presentata nel capitolo 2.1.1 come curva di deflusso del blocco mobile.

<sup>12</sup> Questo significa che minimizzo b e massimizzo n, ottenendo così la capacità massima.

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.

Si può 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 più rilevante 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.

## 2.2 CAPACITÀ REALE E METODI DI CALCOLO

Dal momento che il blocco mobile non ha ancora trovato alcuna realizzazione pratica, date le difficoltà legate al calcolo odometrico, non è possibile studiare la capacità reale ma solamente quella teorica.

Per quanto riguarda, invece, il blocco fisso sarà 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 invece una certa 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);
- Non omotachicità 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;
- Numero e distanze reciproche degli impianti di linea;
- Parametri di regolarità previsti: il calcolo della capacità è strettamente legato alla regolarità dell'esercizio e il grado di saturazione di una linea ferroviaria comporta irregolarità d'esercizio, che si traduce 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);

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.

### 2.2.1 MODELLO STATICO FS

Le Ferrovie dello Stato, sino alla fine degli anni 90, utilizzavano un modello analitico deterministico 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<sup>13</sup> T calcolata sulla sezione critica<sup>14</sup>;
- N = Nv + Nm è il numero totale di treni 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.

<sup>13</sup> Nel caso di linee a doppio binario si riferisce a ciascun senso di marcia.

<sup>14</sup> Sezione che presenta il maggior tempo complessivo di occupazione.

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

- 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);
- i tempi di percorrenza risultano genericamente riferiti ai treni viaggiatori e merci senza ulteriore specificazione;
- non è possibile in nessun modo tenere conto dei periodi di punta, nei quali la circolazione risulta più congestionata, a discapito della regolarità complessiva.
- 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 corretto riferirsi alle sole circolazioni residue;

### 2.2.2 MODELLI ANALITICI PROBABILISTICI: IL METODO UIC

Nel 1978 la UIC <sup>15</sup> ha proposto un modello analitico probabilistico che 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.

Questo metodo prevede di assimilare l'accesso alla sezione di linea ad un *sistema di coda*. 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

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

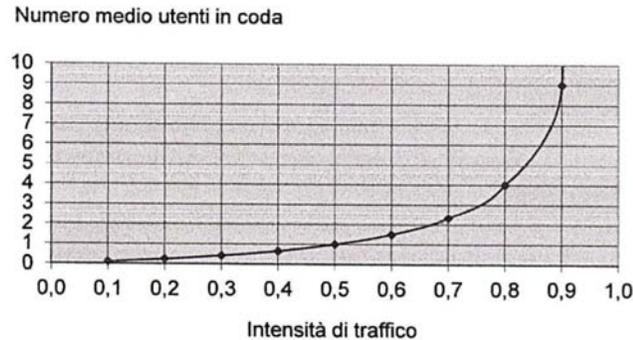
Dove:

- $T_{\min}$  rappresenta il tempo minimo di distanziamento tra due treni successivi per mantenere le distanze di sicurezza
- $b$  rappresenta, invece, il tempo medio fra due arrivi successivi.

---

<sup>15</sup> Union Internationale Des Chemins De Fer è un'istituzione di normazione internazionale specializzata nel mondo dell'industria del trasporto ferroviario.

Si devono considerati i valori medi, di  $T_{\min}$  e  $b$ , dal momento che sia il tempo di servizio, sia il tempo tra due arrivi successivi sono variabili aleatorie.



**Figura 33 - Rapporto intensità di traffico e numero di treni in coda**

Risulta necessario che sia  $\Psi < 1$  in modo tale che il sistema non raggiunga le condizioni di stazionarietà e la lunghezza della coda, all'aumentare del tempo, tenda all'infinito. L'intensità di traffico può essere, quindi, riscritta nel seguente modo:

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

dove  $T_r$  è il tempo di attesa per entrare in una sezione.

La UIC ha svolto un'estesa campagna di test che ha portato a identificare dei valori limiti di  $\Psi$  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  $T_r \geq 0,33 T_{\min}$ .

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

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

dove:

- $T$  è il tempo di riferimento;
- $T_{zu}$  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. I risultati dei suddetti test

hanno suggerito di adottare il valore:

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

dove la quantità  $a$  rappresenta il numero dei posti di blocco intermedi della tratta determinante.

### 2.2.3 MODELLI ANALITICI PROBABILISTICI: IL METODO DB

Un metodo analitico probabilistico è stato messo a punto dalle ferrovie federali tedesche (DB) per la quantificazione della capacità delle linee.

L'espressione della capacità, riferita all'intera giornata, è in questo caso esprimibile nel seguente modo:

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

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:

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

dove:

- $N_v$  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, ma soprattutto dei parametri di regolarità dell'esercizio che si intende imporre.

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

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

dove:

- $P_f$  è il ritardo totale giornaliero che si tollera venga generato nella sezione di riferimento, in conseguenza al ritardo dei treni rispetto al programma d'esercizio;
- $We$  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  $T$ .

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

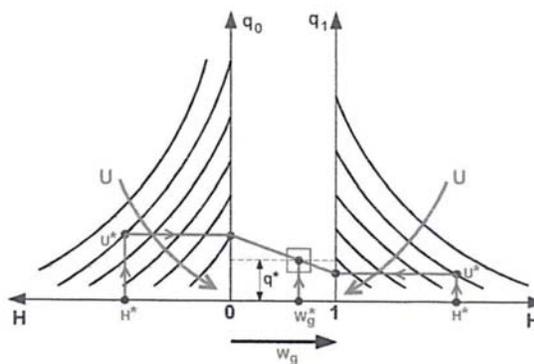
$$U = \frac{T_{\min}}{P_m}$$

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, oppure dall'espressione:

$$W_g = \frac{T_{vv}Nv^2 + T_{ll}Nl^2}{(T_{vl} + T_{lv})NvNl}$$

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.



**Figura 34 - Metodo per determinare q**

#### 2.2.4 CONFRONTO TRA I METODI ANALITICI

I metodi di tipo probabilistico (UIC e DB) risultano certamente più attendibili rispetto a quelli deterministici, che sono più empirici ed approssimativi e meno flessibili rispetto alle possibili variazioni delle caratteristiche delle linee.

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.

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

Inoltre la procedura prevista dal metodo DB è più facilmente riproducibile rispetto a quella UIC, basata su algoritmi.

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

Nello sviluppo del processo di simulazione, le maggiori difficoltà operative si incontrano per la stretta correlazione esistente fra:

- parametri costruttivo-operativi
- rappresentazione di una grande quantità di treni contemporaneamente circolanti

I termini citati hanno complesse influenze reciproche, spesso non esprimibili attraverso un'esplicita espressione analitica.

Nella maggioranza dei casi si opera 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).

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:

**Tabella 9 - Esempi di modelli con le diverse caratteristiche**

<b>Tecniche</b>	<b>Campi di applicazione ottimali</b>	<b>Vantaggi</b>	<b>Svantaggi</b>	<b>Modelli</b>
Teoria dei grafi	- Topologia infrastruttura	- Trasparenza - Rappresentabilità della topologia - Riproducibilità	- Staticità - Limitata chiarezza delle reazioni	FAKTUS PROLOP SIMU
Reti di Petri	- Topologia infrastruttura - Controllo esercizio	- Sintesi tra teoria dei grafi e dinamiche discrete - Struttura gerarchica	- Assenza di dinamica continua	DISPOS SABINE
Linguaggio di programmazione / Software di simulazione	- Topologia infrastruttura - Controllo esercizio - Programmazione esercizio	- Flessibilità - Strutturazione ad oggetti - Semplicità di esecuzione	- Limitata possibilità di analisi - Rappresentazione discreta del processo	OPENTRACK RAILSYS FAKTUS RWS SIMU SITRAF/S TRANSIT
Formalismi descrittivi	- Tecnologie di sicurezza	- Dimostrabilità - Astrazione	- Necessità di modellazione - Scarsa flessibilità	HOL WDM
Comparazioni differenziali (analisi degli elementi finiti)	- Dinamica moto - Dinamica veicolo	- Rappresentabilità del processo fisico	- Difficoltà di rappresentazione delle tecnologie di sicurezza - Rappresentazione discreta del processo	Vari e numerosi
Processi analitici (sequenze di algoritmi)	- Controllo esercizio - Programmazione esercizio - Potenzialità infrastrutture	- Semplicità di formulazione delle reazioni - Astrazione	- Scarsa rappresentabilità di dati concreti - Genericità dei risultati - Impossibilità di rappresentazione delle logiche di sicurezza	PROLOP STRELE

## 2.3 CONSIDERAZIONI FINALI SULLA CAPACITÀ

Dall'analisi della capacità qui effettuata, ed in particolare dall'espressione della capacità reale nel caso di blocco fisso, si può 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 capacità di una linea sono le seguenti:

- **La velocità:** la capacità massima si ottiene in corrispondenza della velocità critica
- **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.
- **I sistemi di circolazione:** dal sistema utilizzato dipende il distanziamento minimo da rispettare, oltre che la velocità massima di percorrenza.
- **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.
- **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'individuazione e la risoluzione di eventuali cause sistematiche di ritardo, consente di aumentare la capacità.
- **Il materiale rotabile, le infrastrutture e i sistemi di segnalamento:** il miglioramento delle loro caratteristiche può comportare un aumento della capacità (ad esempio un migliore sistema frenante del treno, una riduzione dei tempi di azionamento e di riassetto dei segnali, ecc.).

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.

Per accrescere la capacità di una linea esistente (in seguito, ad esempio, all'aumento della domanda relativa a quella linea) bisogna agire sui parametri descritti nel modo più opportuno ed anche, eventualmente, aggiungere dei binari.

Se si vuole aumentare l'offerta di una linea andando incrementando i servizi simili e compatibili con quelli già presenti (ad es. aggiungendo 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.

Qualora si desideri, invece, aggiungere servizi differenti (ad es. treni, diversi per velocità, da quelli già in utilizzo) si deve innanzitutto verificare l'adattabilità della linea. 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.

### 3. 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 di poter ottenere attraverso l'impiego della tecnologia livelli di sicurezza molto superiori a quelli garantiti dall'uomo.

#### 3.1 RIPETIZIONE DEI SEGNALI A BORDO DEI LOCOMOTORI

Un importante passo verso il superamento della "marcia a vista" è stato ottenuto con la realizzazione di sistemi ed impianti che consentono la ripetizione dei segnali fissi della linea a bordo dei locomotori.

I vantaggi che ne derivano sono molteplici:

- **superamento di tutti i limiti e le problematiche legate alla visibilità dei segnali:** con la marcia a vista, infatti, condizioni atmosferiche avverse come nebbia, neve e temporali, o anche semplicemente una distrazione del conducente possono far sì che venga superato un segnale a via impedita sfuggito all'attenzione del macchinista;
- **Maggiore velocità di percorrenza permessa;**
- **Possibilità di memorizzare l'indicazione del segnale** a bordo del treno, in modo tale da poterla osservare per un periodo di tempo che non sia limitato al solo transito nella zona di visibilità;
- **Possibilità di collegare un intervento automatico del sistema di frenatura al sistema di segnalazione;**
- **Possibilità di collegare alle indicazioni dei segnali un'indicazione acustica** che avvisi il conducente ad ogni passaggio di segnale.

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

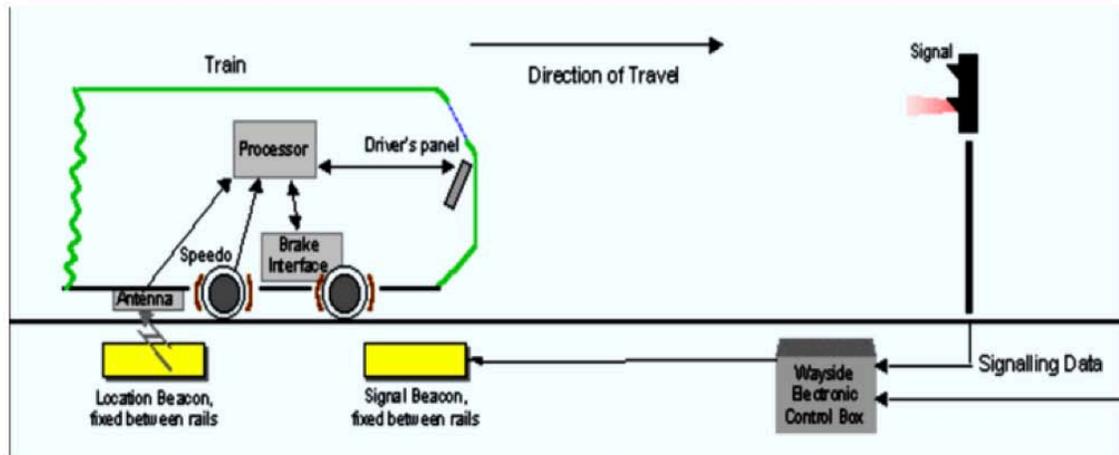
- I sistemi puntiformi o discontinui RSDD (Ripetizione Segnali Digitale Discontinua)
- I sistemi continui RSC (Ripetizione Segnali Continua)

I sistemi discontinui utilizzano dispositivi chiamati boe o balise, disposti lungo la linea e collegati agli impianti di segnalamento; essi sono 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.

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 nei confronti dell'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

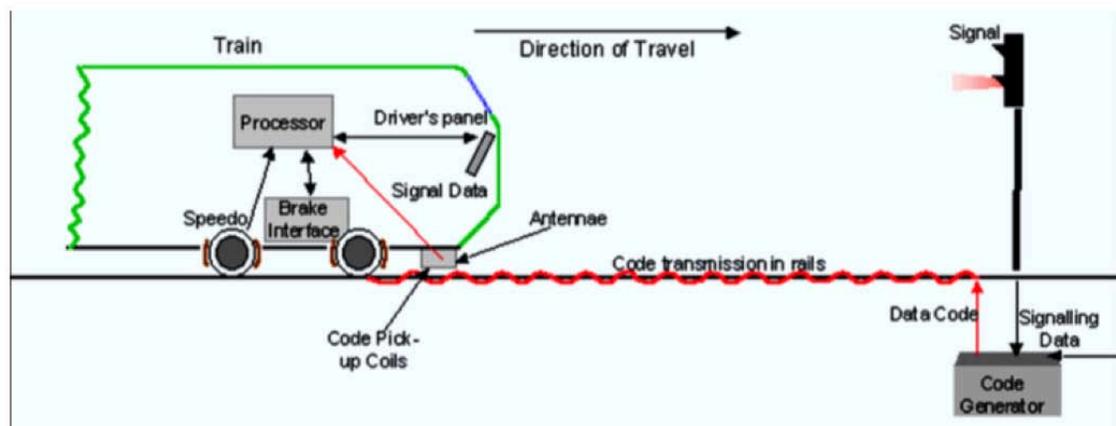
segnale, ma anche in funzione dei limiti imposti dal rotabile e dalla linea.



**Figura 35 - Sistema di ripetizione segnali digitale discontinua**

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 di 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 recepita solamente nel transitare alla boa successiva).

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.



**Figura 36 - Sistema di ripetizione segnali continua**

Per entrambi i sistemi sono previsti dispositivi, definiti captatori, in grado per l'appunto di cogliere le informazioni trasmesse dalle boe o dalle correnti codificate. L'apparecchiatura di bordo codifica tali informazioni e le comunica in macchina attraverso 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:

**Tabella 10 - Indicazioni in cabina dei codici captati**

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

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.

### 3.1.1 SISTEMA DI SUPPORTO ALLA CONDOTTA - SSC

Gli ATP<sup>16</sup> sono un altro elemento fondamentale per garantire la sicurezza della marcia; essi sono dei 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<sup>17</sup>, sino a riportare la velocità del treno a valori minimi, detti velocità di rilascio, 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.

Il Sistema di Supporto alla Condotta è un sistema di sicurezza ATP che protegge in maniera trasparente la marcia del treno rispetto al personale di condotta e presenta tecnologia di transponder a microonde (di tipo "Telepass").

Il sistema SSC è installato su 4.213 km della rete italiana, di cui 221 km in doppio attrezzaggio SSC+SCMT, ed è il sistema ATP sviluppato da RFI per le linee che non saranno interessate da interoperabilità Europea.

Il Sistema di Supporto alla Condotta (SSC) si compone di un SottoSistema di Terra (SST) e un SottoSistema di Bordo (SSB).

<sup>16</sup> Automatic Train Protection

<sup>17</sup> La frenatura di emergenza verrà poi esaminata nel capitolo 4

### 3.1.1.1 SOTTOSISTEMA DI TERRA - SST

Il SottoSistema di Terra del SSC è composto da due elementi fondamentali:

- **Encoder:** che si interfaccia con il segnale luminoso laterale in modo da prelevarne l'aspetto e l'alimentazione necessaria ad esso e al trasponder. L'encoder codifica opportunamente l'aspetto del segnale luminoso prelevato e invia i telegrammi informativi al trasponder;
- **Trasponder:** è un dispositivo semi-passivo che viene energizzato al passaggio del treno dall'SSB di quest'ultimo affinché possa trasmettere il telegramma informativo associato all'aspetto del segnale luminoso.

Encoder e trasponder insieme formano un *punto informativo* (PI) e si trovano a fianco del binario.



**Figura 37 - Punto informativo**

Il SottoSistema di Terra ha il compito di trasmettere al treno, tramite il trasponder, una serie di informazioni tra cui:

- Aspetto dei segnali luminosi fissi;
- Limiti imposti di velocità;
- Rallentamenti e riduzioni di velocità;
- Ulteriori dati per la sicurezza del sistema.

I PI sono installati sia in stazione che lungo linea e ne esistono anche in grado di trasmettere informazioni diverse da quelle dei segnali luminosi.

La rilevazione dello stato di libertà o occupazione del binario viene effettuato con i dispositivi canonici (CdB e conta assi) che comunicano con il centro di controllo, il quale a sua volta commuta lo stato dei segnali luminosi gestendo il distanziamento dei treni.

Caratteristica	Valori di Riferimento
Alimentazione Encoder	Direttamente dal Segnale oppure dedicata: 150 Vac +10%/-15%
50 Hz $\pm$ 5%	
Numero massimo di Transponder pilotabili	1
Distanza massima tra Encoder e Transponder	20 metri
Distanza massima tra Encoder e alimentatore TAG	130 metri
Numero massimo di telegrammi configurabili nell'encoder	30
Lunghezza massima per singolo telegramma	48 byte
Tensione fornita verso l'alimentatore TAG	24Vdc $\pm$ 25%
Consumo (complessivo con un Transponder pilotato e alimentatore TAG)	~ 1.1W
Alimentazione Transponder	9 Vdc $\pm$ 10%
Potenza massima assorbita Transponder	250 mW
Alimentazione Transponder TAG	24Vdc $\pm$ 10%
Potenza massima assorbita Transponder TAG in fase di trasmissione	200 mW
Potenza massima assorbita Transponder TAG in fase di Stand-by	8 mW
Autonomia Alimentatore TAG in assenza di tensione da Encoder	~ 24 h
Temperatura di funzionamento	-25°C + + 70°C
Temperatura di immagazzinamento	-40°C + + 85°C
Umidità relativa	4%u.r. + 95%u.r.

**Figura 38 - Caratteristiche tecniche SST**

### 3.1.1.2 SOTTOSISTEMA DI BORDO - SSB

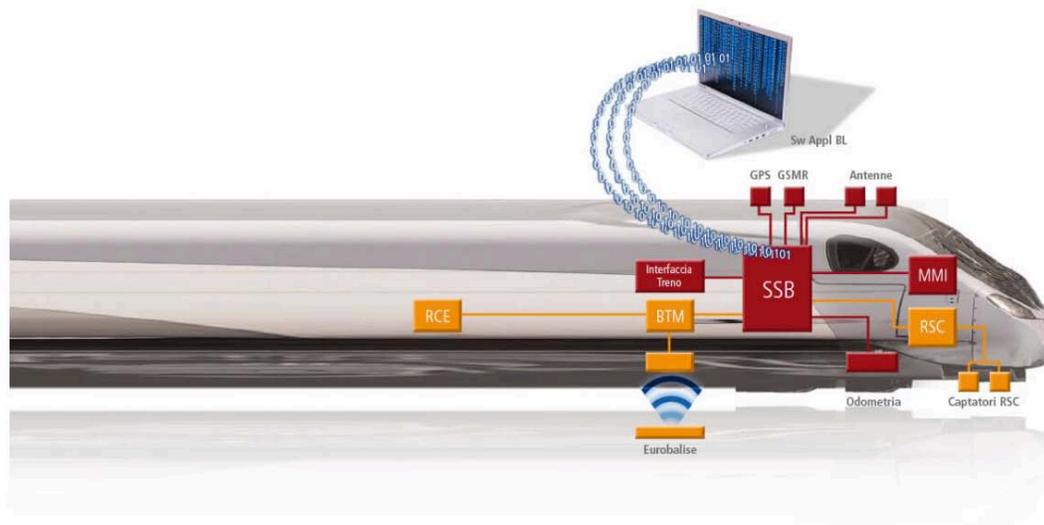
Il SottoSistema di Bordo è installato sul treno ed è composto da diversi dispositivi che monitorano e proteggono la marcia del treno. In particolare l'SSB è costituito da:

1. **Logica di bordo** che è a sua volta composta da:

- elaboratore Digitale in Sicurezza;
- un cruscotto per ciascuna cabina di guida (per i rotabili a singola cabina è previsto un solo cruscotto) con avvisatore acustico integrato;
- GPS e GSM-R o GSM (dove non è presente copertura GSM-R);

- quadro di distribuzione dell' alimentazione.

## 2. Antenne Riceventi (Rx) anteriori e posteriori con relative schede ricevitore.



**Figura 39 - Schema SSB dell'SSC**

Il SottoSistema di Bordo realizza un controllo di velocità continuo; qualora la marcia del treno non rispetti i vincoli di velocità impostati, il sistema comanda la frenatura di emergenza.

Le informazioni necessarie per lo svolgimento di queste funzioni di controllo vengono ricevute, da parte del SSB, da:

- organi esterni interfacciati per acquisire ed elaborare, in tempo reale, l'informazione di posizione (sistemi tachigrafici di bordo, GPS);
- transponder del SST, i quali trasmettono informazioni codificate in telegrammi sullo stato dell'infrastruttura ferroviaria, indicando anche la distanza dal PI successivo. Il tutto è finalizzato all'individuazione dei vincoli di velocità a cui attenersi.

L'individuazione dei profili di velocità in tempo reale è realizzata elaborando separatamente i tetti di velocità imposti, rispettivamente, dal segnalamento, dai parametri di linea e dai rallentamenti. Una volta che sono stati generati tre profili limite di velocità come funzione della posizione, si prende a riferimento il valore di velocità più basso.

Caratteristica	Valori di Riferimento
Alimentazione Elaboratore Digitale in Sicurezza	18 - 36Vdc
Alimentazione Cruscotto	18 - 36Vdc
Consumo Elaboratore Digitale in Sicurezza	100W
Consumo Cruscotto	20W
Temperatura di funzionamento	-25°C ÷ + 55°C
Temperatura di immagazzinamento	-40°C ÷ + 85°C
Umidità relativa	4%u.r. + 95%u.r.
Alimentazione Antenne Riceventi	18 - 36Vdc
Consumo Antenne Riceventi	10W (è esclusa la potenza delle scaldiglie pari a 75 W/cdi)
Temperatura di funzionamento Antenne Riceventi	-25°C ÷ +70°C
Temperatura di immagazzinamento Antenne	-40°C ÷ + 85°C
Umidità relativa Antenne Riceventi	4%u.r. + 95%u.r.

Piena conformità a En50155 e ST306158

**Figura 40 - Caratteristiche tecniche**

### 3.1.1.3 TRASFERIMENTO DI INFORMAZIONI TRA SST E SSB

Il trasferimento di informazioni tra SST e SSB avviene in maniera discontinua ed è basato su una tecnologia a microonde, con frequenza di circa 6 GHz. Quando il rotabile transita in asse ad un PI il SottoSistema di Bordo, tramite l'antenna del receiver, energizza il trasponder.



**Figura 41 - Trasferimento telegrammi SSC**

Il trasponder, quindi, trasmette il telegramma informativo che gli è stato inviato dall'encoder.

Le apparecchiature di bordo acquisite tali informazioni controllano che il treno sia condotto in maniera corretta.

### **3.1.2 SISTEMA DI CONTROLLO DELLA MARCIA DEI TRENI – SCMT**

Le Ferrovie dello Stato Italiano hanno elaborato, a partire dal 2000, un sistema di controllo innovativo e idoneo all'esercizio con i diversi regimi di circolazione; questo sistema detto SCMT è applicabile a livello nazionale sia per le linee munite di sistema di blocco automatico a correnti codificate sia per quelle che ne sono sprovviste. Il sistema ha richiesto una complessa fase di sviluppo ed omologazione in accordo con le attività di verifica, validazione e valutazione definite dalle normative europee.

Il sistema di controllo della marcia dei treni SCMT è il più diffuso sistema ATP nella rete italiana. Esso attua una protezione della marcia del treno istante per istante supervisionando l'operato del PdC<sup>18</sup>, limitando le informazioni visualizzate e le interazioni richieste. Il PdC dunque potrà continuare a guidare con le attuali modalità e norme vigenti. Il sistema interviene automaticamente nel caso in cui non vengano rispettati i limiti imposti relativi a:

- condizioni determinate dai segnali luminosi;
- velocità massima consentita dalla linea;
- velocità massima nei confronti di rallentamenti;
- velocità massima ammessa dal materiale rotabile.

L'SCMT è stato attrezzato, fino ad ora, in 11.856 km della rete ferroviaria italiana ed è costituito da un SST e un SSB strettamente integrati con gli standard ERTMS/ETCS L1. Esso si integra con i sistemi di blocco elettrico automatico, blocco elettrico manuale e blocco conta assi.

Il sistema SCMT è costituito da un SottoSistema di Terra (SST) che elabora, tramite encoder, le informazioni trasmettendone il contenuto, grazie a trasponder passivi installati sulle traversine della linea ferroviaria chiamati "boe", al SottoSistema di Bordo (SSB) che riceve e traduce tali dati applicando le opportune protezioni.

Le informazioni trasmesse dal SottoSistema di Terra vengono elaborate continuamente dal computer del SottoSistema di Bordo che comanda l'intervento automatico della frenatura di emergenza, quando il Personale di Condotta non rispetta i limiti minimi calcolati.

---

<sup>18</sup> Personale di Condotta

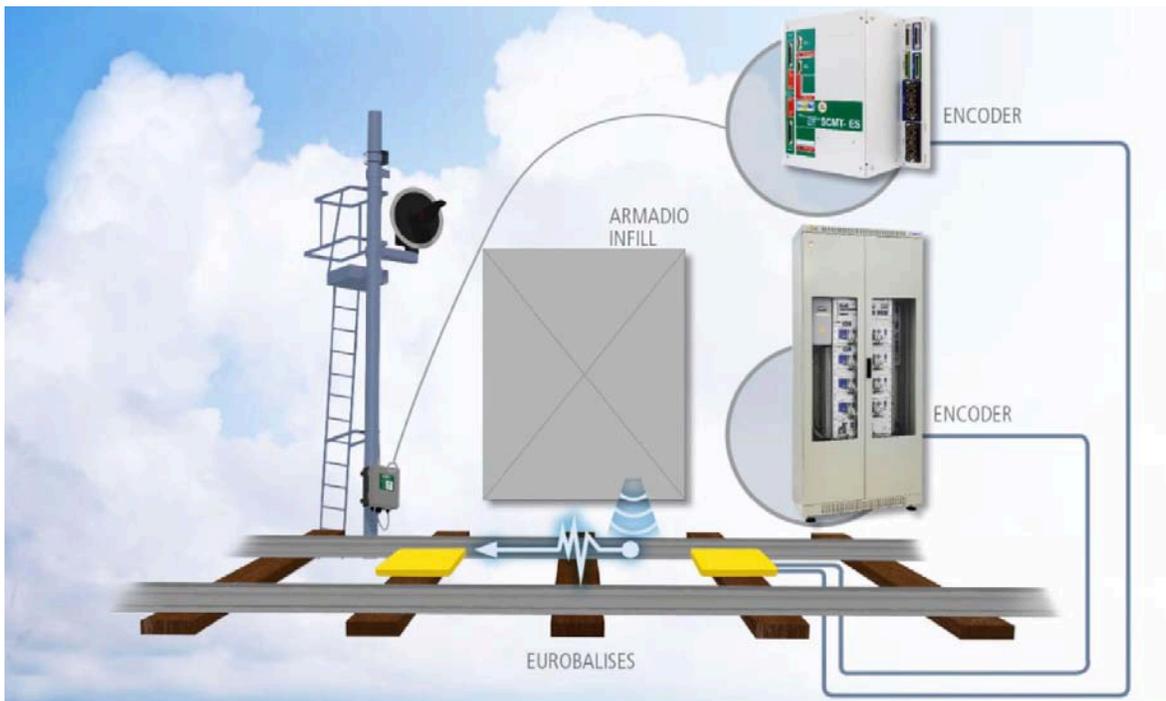


Figura 42 - Panoramica italiana dei sistemi tecnologici di sicurezza

### 3.1.2.1 SOTTOSISTEMA DI TERRA SCMT

Il SottoSistema di Terra del SCMT è composto dai seguenti elementi:

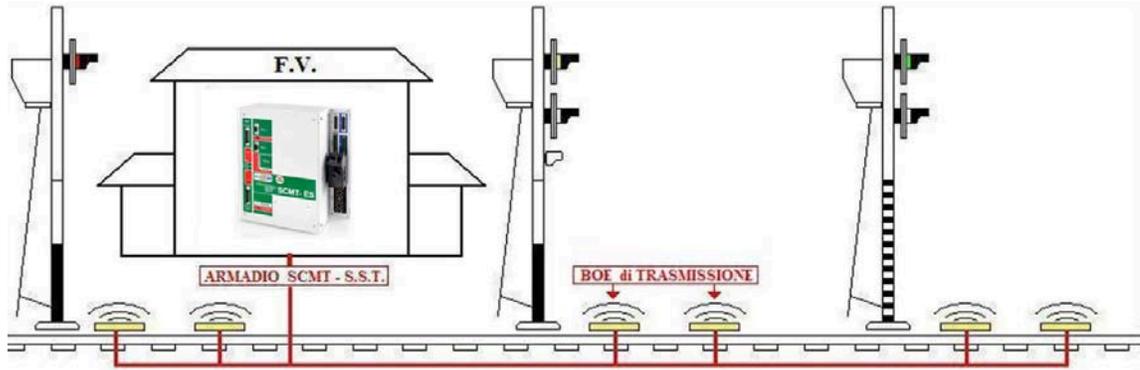
- **Sistemi di Encoder da Stazione** (o "Armadi di Stazione");
- **Sistemi di Encoder di Linea** (o "Armadi di Linea");
- **Encoder da Segnale** (SCMT-ES);
- **Sistema INFILL.**



**Figura 43 - Schema SST del SCMT**

In funzione dell'aspetto dei segnali luminosi l'impianto di segnalamento trasmette le informazioni agli encoder. Gli encoder selezionano i telegrammi e li inviano tramite il cavo di collegamento alle balise, che fanno parte dei Sistemi di Encoder di Linea. Le boe forniscono informazioni sulle condizioni del segnalamento, sulle caratteristiche della linea e su prescrizioni di rallentamento. Per garantire la sicurezza, le informazioni sono trasmesse da due balise poste a 3 m l'una dall'altra che costituiscono il Punto Informativo (PI) del sistema SCMT.

In base all'ordine in cui vengono letti (prima boa 1, poi boa 2 o viceversa) il SottoSistema di Bordo riconosce se il PI è valido per il suo senso di marcia o per quello contrario. I PI validi per uno stesso senso di marcia sono legati da una catena di appuntamento di modo che la logica di bordo conosca qual è il prossimo PI.



**Figura 44 - Catena di appointment di PI nel SCMT**

L'SST è integrabile con l'apparato dei CdB a correnti codificate in modo tale da poter trasferire informazioni all'SSB in anticipo rispetto al passaggio sul PI, aumentando così l'efficienza del traffico. In questo caso le informazioni ricavate dai codici vengono visualizzate sul cruscotto e sono visibili al PdC che, quindi, può operare in conseguenza. La protezione ATP viene fatta dal sistema utilizzando sia le informazioni provenienti dai CdB che quelle provenienti dai PI dell'SCMT.

Tipo	Armadio di stazione	Armadio di Linea
Tensione di alimentazione	150Vac±20% 220Vac±20%	150Vac±20% 220Vac±20%
Potenza nominale	600W	250W
Dimensione H×W×L	2200×990×450 mm	1400×860×450 mm
Peso	240Kg	120Kg
Meccanica	Lamiera pressopiegata	Acciaio portante/Vetroresina
Colore	RAL 7044	RAL 704
Ambiente di esercizio	Edifici di stazione	Luoghi esterni al binario
Temperatura di esercizio	0 + +40°C	-25 + +70°C
Grado di protezione IP	20	44
Numero max canali di uscita	32 (128*)	8
Numero max canali di ingresso	16×8 (16×32*)	16×2
Unità Encoder SIL4	1÷8 (1÷32*)	1÷2
Sincronizzazione oraria	GPS/ GSM-R	GPS/GSM-R
Diagnostica/Reg. eventi	Remotizzabile GSM-R	Remotizzabile GSM-R
MTBF	>60 000h	>60 000h
Classe isolamento EN 60950-1	II	II
Marcatura	CE/IS402	CE/IS402

**Figura 45 - Caratteristiche tecniche**

### 3.1.2.2 SOTTOSISTEMA DI BORDO SCMT

Il SottoSistema di Bordo del SCMT è costituito da:

- **Elaboratore di bordo:** il vero e proprio cervello del sistema di bordo, deputato all'elaborazione di tutti i dati significativi provenienti da sensori e dai vari sistemi di segnalamento attivi in quel momento; l'elaboratore è in grado di interfacciarsi con i principali dispositivi del treno per garantirne una conduzione regolare e sicura da parte del Personale di Condotta;
- **Interfaccia Uomo-Macchina (MMI):** questo display costituisce l'elemento di collegamento ed interazione tra personale di condotta e macchina;
- **Antenna di captazione del SCMT:** in grado di energizzare, leggere ed interpretare le informazioni provenienti dalle balise posizionate lungo i binari al passaggio del treno ed inviare tali informazioni all'elaboratore di bordo;
- **Sistema di captazione dei codici del Blocco Automatico a correnti codificate.**

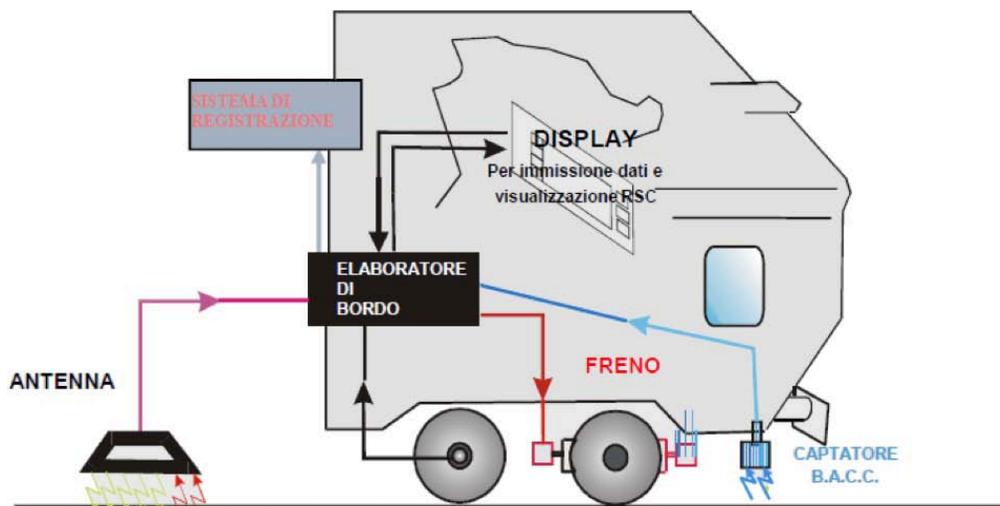


Figura 46 - Schema del SSB del SCMT

Il SottoSistema di Bordo ha il compito di raccogliere le informazioni dai PI e di elaborarle continuamente confrontando la velocità istantanea del treno con la velocità massima ammessa:

- dai vincoli del segnalamento
- dalle caratteristiche del treno e dell'infrastruttura ferroviaria
- dalla presenza di situazioni particolari come lavori o rallentamenti.

Per queste ragioni il PdC, alla partenza, deve inserire i dati del treno nel sistema (e.g.: massa frenata, lunghezza del convoglio, merci/viaggiatori, velocità massima ammessa dal materiale rotabile).

Il SSB è equipaggiato con dispositivi tachimetrici con i quali misura spazio, velocità ed accelerazione; tali

dati vengono elaborati e viene costruito un profilo dinamico. Il profilo è, dunque, confrontato istante per istante con la velocità ammessa e, qualora il PdC non rispetti i limiti imposti, il conducente viene avvertito tramite un segnale acustico e il computer di bordo elabora una curva di frenatura, compatibile con le caratteristiche del rotabile, 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.

Inoltre il sistema è strutturato in modo tale che al passaggio su una boa venga 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'emergenza.

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

### **3.1.3 SCC e CTC PER IL TELECOMANDO DELLA CIRCOLAZIONE**

Il Sistema di comando e controllo (SCC), così come il Centralized Traffic Control (CTC), consente il telecomando e la regolazione, a distanza, della circolazione di treni su linee e stazioni da postazioni centrali (Posti Centrali- PC).

Questi sistemi permettono, quindi, agli operatori di supervisionare in tempo reale la posizione dei treni lungo la rete e all'interno degli impianti ferroviari.

Il **Sistema di comando e controllo (SCC)** in adozione sulle direttrici fondamentali e sui principali nodi ferroviari metropolitani, insieme alla sua evoluzione per le linee Alta Velocità (SCC-AV), è il più avanzato sistema di gestione a distanza della circolazione in uso in campo ferroviario.

Sviluppato per migliorare e garantire la regolarità dei treni nell'ambito del processo di aggiornamento della qualità dei servizi, consente di gestire insieme alla circolazione anche la diagnostica, la manutenzione, l'informazione per il pubblico e la videosorveglianza; permette, inoltre, di semplificare le procedure di gestione e ottenere la massima tempestività ed efficacia nella risoluzione dei problemi di circolazione anche su linee ad intenso traffico.

Per mezzo di una logica computerizzata, il SCC invia comandi e riceve controlli in sicurezza da strumenti elettromeccanici (scambi, segnali, etc.) ed apparati (PC di posti periferici). L'architettura tecnologica e funzionale del sistema è articolata in sale di controllo presenziate, dove sono concentrate le tecnologie e l'organizzazione, e posti periferici solitamente impresenziati (stazioni, posti di comunicazione, posti di movimento...) che garantiscono il colloquio tra il posto di comando e le linee gestite.

Il **sistema Centralized Traffic Control (CTC)**, capostipite dei sistemi di comando a distanza della circolazione, è utilizzato prevalentemente su linee regionali e interregionali e consente di realizzare da un "posto centrale" il telecomando e la supervisione di un elevato numero di stazioni e fermate non presenziate.

Alcune linee, a scarso traffico, sono invece attrezzate con il **sistema Controllo Centralizzato Linee (CCL)**, che, a differenza dei sistemi SCC e CTC, non consente il telecomando della circolazione, ma garantisce alcune funzioni di supervisione e di gestione quali: la successione dei treni, il monitoraggio e la supervisione della posizione istante per istante. Insieme al CTC anche il CCL è integrato con sistemi specializzati e funzionali alla gestione dell'informazione al pubblico sulla marcia dei treni sviluppati nell'ambito dell'Information & Communication Technology.

Al 31 dicembre 2015 il sistema CTC è attivo su 8.297 km e il sistema SCC su 3.915 km



Figura 47 - Linee telecomandate

## 4. MODELLO DI FRENATURA RFI DA UTILIZZARE PER IL SOTTOSISTEMA DI BORDO

Il modello RFI è, in linea di principio, applicabile ad ogni tipologia di treno e di sistema frenante rispondente alla normativa UIC<sup>19</sup>.

Esso fornisce lo spazio percorso dal treno in seguito ad azionamento della frenatura di emergenza, a partire dall'istante in cui il Sotto Sistema di Bordo comanda tale azionamento fino al raggiungimento della velocità obiettivo; sono esclusi i tempi necessari al sistema nel suo complesso al fine di pervenire a tale comando e gli errori introdotti dal sistema nella misura della velocità istantanea e dello spazio percorso.

Da questo momento in poi si indicherà con l'espressione "spazio di frenatura" lo spazio calcolato dal modello nelle condizioni descritte.

### 4.1 MODELLO DI FRENATURA A GRADINO

Il modello approssima lo sviluppo della frenatura reale del treno distinguendo una fase transitoria ed una fase a regime.

La fase transitoria della frenatura corrisponde alla fase iniziale, durante la quale la depressione nella condotta generata dall'azionamento della frenatura si propaga per tutta la lunghezza del treno, azionando i distributori in sequenza, a partire dalla testa del treno.

La fase a regime della frenatura corrisponde alla seconda fase, in cui la frenatura ha raggiunto l'efficienza a regime su tutti gli assi frenanti del treno.

Entrambe le fasi sono caratterizzate da un valore di decelerazione variabile. Durante la prima fase, la decelerazione è inizialmente nulla, a causa dei ritardi caratteristici del freno, e poi cresce progressivamente, man mano che gli assi iniziano a frenare. Durante la seconda fase la decelerazione varia in funzione della velocità istantanea del treno, in base alle caratteristiche specifiche degli organi frenanti. In entrambe le fasi si possono inoltre avere variazioni nella decelerazione dovute ad una serie di fattori casuali e sistematici.

Il modello adottato considera due fasi della frenatura. Durante la prima fase la decelerazione dovuta alla frenatura è considerata nulla. Durante la seconda è considerata costante per tutto lo sviluppo della frenatura fino al raggiungimento della velocità obiettivo.

Il profilo di decelerazione, rappresentato in funzione del tempo e prodotto dalla frenatura, è una funzione a gradino.

I grafici rappresentano schematicamente, a partire dall'istante di inizio frenatura, l'andamento della velocità in funzione dello spazio percorso e della decelerazione in funzione del tempo.

È stato rappresentato il caso di linea in discesa, con decelerazione negativa dovuta alla pendenza.

Nella prima fase la velocità può variare, a partire dal valore iniziale  $V$ , in funzione della decelerazione  $d_i$  determinata dalla pendenza della linea. Dopo un tempo  $t_f$  termina la prima fase, durante la quale la velocità si è portata al valore  $V_B$ , ed inizia la seconda fase della frenatura, caratterizzata dalla presenza

---

<sup>19</sup> Union internationale des chemins de fer

della decelerazione  $d_p$  dovuta alla frenatura.

Nel grafico sono rappresentate, qualitativamente, anche il presumibile andamento della velocità reale del treno in funzione dello spazio percorso ed il presumibile andamento della decelerazione reale del treno in funzione del tempo.

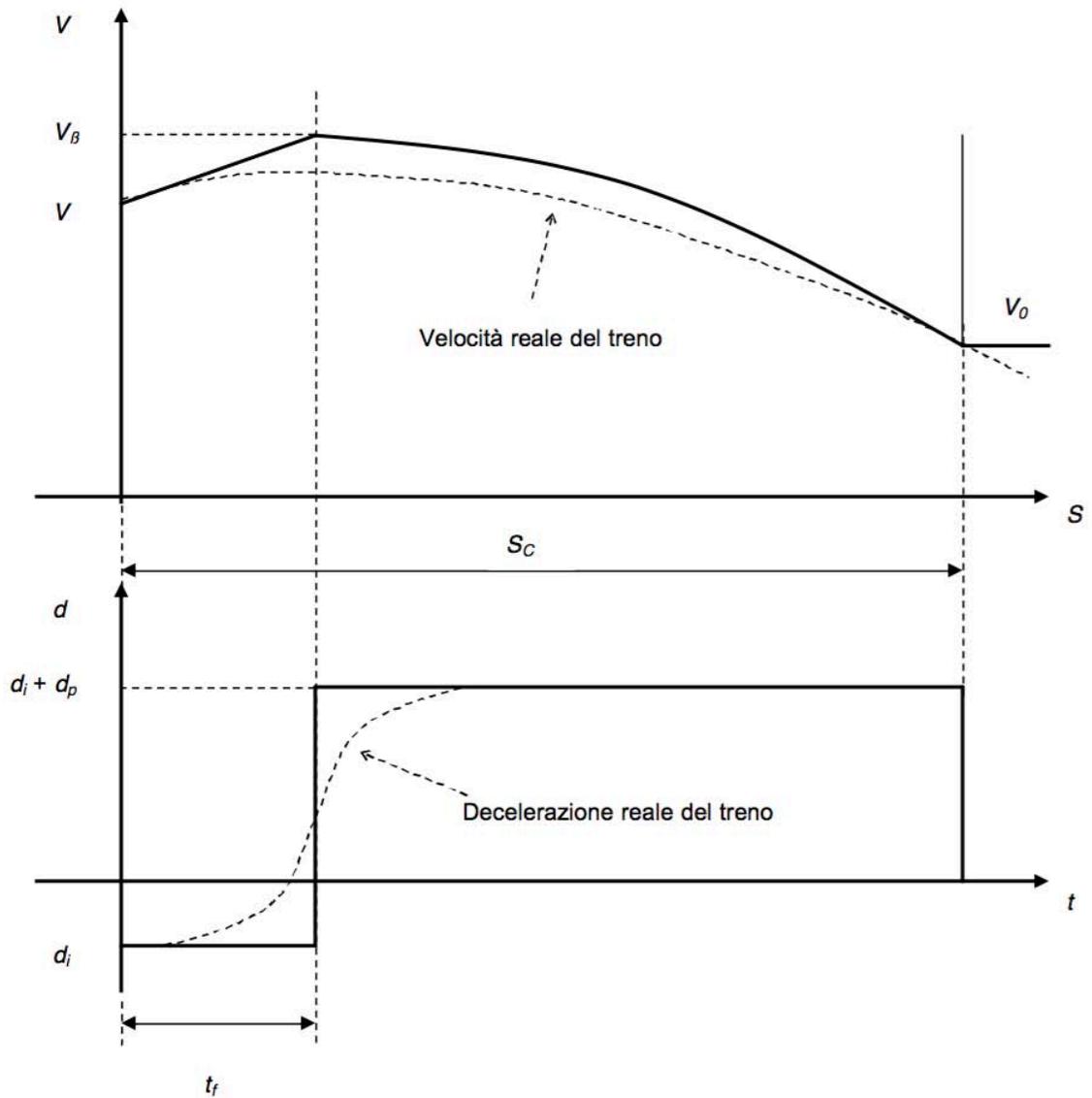


Figura 48 - Rappresentazione del modello di frenatura a gradino

## 4.2 APPLICAZIONE DEL MODELLO FRENATURA

Il modello matematico fornisce lo spazio di frenatura in funzione di una serie di variabili e di parametri, che sono descritti nelle apposite tabelle.

Nelle formule e nelle tabelle che seguono, se non diversamente specificato, tutti i tempi sono espressi in s (secondi), gli spazi in m (metri), le velocità in m/s e le decelerazioni in  $\text{m/s}^2$ .

Le velocità, solo nel testo e nelle tabelle, ma non nelle formule, possono essere espresse per comodità in km/h, e in questo caso la particolare unità di misura è esplicitata.

I valori in km/h devono essere convertiti in m/s prima di essere utilizzati nei calcoli.

Le variabili di ingresso del modello sono le velocità iniziale ed obiettivo, la percentuale di massa frenata, la pendenza della linea e tempo di ritardo del SottoSistema di Bordo, i cui campi di variabilità sono riassunti in tabella.

**Tabella 11 - Variabili di ingresso**

Variabile	Simbolo	Intervallo di definizione	Passo
Velocità iniziale	V	$[0 ; V_{R \max}]$	1
Velocità obiettivo	$V_0$	$[0 ; V_{R \max}]$	1
Percentuale di massa frenata <sup>20</sup>	$\lambda$	$[45 ; 160]$	5
Pendenza della linea	i	$[- 0,035 ; 0,035]$	0,001
Tempo di ritardo SSB	h	$[0; 5]$	0,1

---

<sup>20</sup> Le singole masse frenate dei vari rotabili che compongono un convoglio contribuiscono a definire la “percentuale di massa frenata” del treno. Tale percentuale si ottiene come rapporto tra due somme: la somma delle masse frenate di tutti i rotabili, diviso la somma di tutte quelle reali, moltiplicato 100. La massa reale corrisponde alla massa del rotabile una volta che questo viene consegnato dalla fabbrica a chi lo userà, mentre la massa frenata è la massa che, agli effetti della frenatura, viene attribuita (rappresenta l’efficacia del treno e si esprime in tonnellate); il massa frenato viene determinato sperimentalmente in funzione di norme stabilite in sede internazionale. Tornando al concetto di percentuale di massa frenata, in passato una percentuale del 90% indicava un buon freno, tuttavia, attualmente è possibile ottenere valori superiori al 130%.



**Figura 49 - Esempio di differenza tra massa reale (peso reale) e massa frenata per il calcolo della “percentuale di massa frenante”**

Il campo di variazione per il valore di velocità iniziale  $V$  del treno è funzione del parametro di configurazione Regime  $R$ , che può assumere i valori  $E$  (Esercizio) o  $P$  (Prova), e non deve superare il valore  $V_{R \max}$  così definito:

$$V_{R \max} = \begin{cases} V_{RE} & \text{se } R = E \\ V_{RP} & \text{se } R = P \end{cases}$$

**Tabella 12 - Velocità di esercizio e di prova**

Parametro	Valore di prima ipotesi	Intervallo di definizione	Passo
$V_{RE}$	330 km/h	[0 ; 400]	1
$V_{RP}$	400 km/h	[0; 400]	1

I campi di variabilità degli altri parametri del modello sono definiti volta per volta nelle tabelle.

#### 4.2.1 CALCOLO DELLO SPAZIO

Lo spazio di frenatura  $S$ , espresso in m, è dato da:

$$S = (h + t_f) * V_{\beta} + \frac{V_{\beta}^2 - V_0^2}{2 * (d_p + d_j)}$$

dove:

- $t_f$  è il tempo durante il quale il modello assume che la decelerazione dovuta alla frenatura sia nulla;
- $h$  è il tempo di ritardo SSB
- $V_\beta$  è la velocità, valutata a partire dalla velocità  $V$ , che il treno può avere nell'istante in cui il SSB comanda l'azionamento della frenatura;
- $V_0$  è la velocità obiettivo;
- $d_p$  è la decelerazione a regime garantita attribuibile alla frenatura;
- $d_i$  è la decelerazione attribuibile alla pendenza della linea (positiva in salita).

Il tempo  $t_f$  durante il quale il modello assume che nessuna forza sia applicata ai freni è dato da:

$$t_f = D_t * t_{ff}$$

dove:

- $D_t$  è un coefficiente di sicurezza ;
- $t_{ff}$  è il tempo di ritardo da associare alla propagazione della depressione in condotta generale.

**Tabella 13 - Parametro  $D_t$**

Parametro	Valore di prima ipotesi	Intervallo di definizione	Passo
$D_t$	1,2	[0; 2]	0,01

#### 4.2.2 CALCOLO DI $t_{ff}$

$$t_{ff} = \begin{cases} t_{fv} & \text{se TipoFreno} = \text{Viaggiatori} \\ \text{MAX}(t_{fv}, t_{fM}) & \text{se TipoFreno} = \text{Merci} \end{cases}$$

con

$$t_{fv} = a_V + b_V * \frac{L(1 - EP)}{100} + c_V * \left( \frac{L(1 - EP)}{100} \right)^2$$

$$t_{fM} = a_M + b_M * \frac{L}{100} + c_M * \left( \frac{L}{100} \right)^2$$

$$EP = \begin{cases} 1 & \text{se FrenoElettroPneumatico} = \text{efficiente} \\ 0 & \text{se FrenoElettroPneumatico} = \text{inefficiente} \end{cases}$$

dove:

- EP vale 1 in presenza di freno elettropneumatico inserito ed efficiente oppure 0 in caso di freno elettropneumatico assente, disinserito o inefficiente.

- I parametri  $a_V$ ,  $b_V$ ,  $c_V$ ,  $a_M$ ,  $b_M$ ,  $c_M$  sono definiti nella seguente tabella:

**Tabella 14 - Parametri per il calcolo di  $t_{ff}$**

Parametro	Valore di prima ipotesi	Intervallo di definizione	Passo
$a_V$	3,5	[0,00 ; 20,00]	0,01
$b_V$	0	[-2,00 ; 2,00]	0,01
$c_V$	0,15	[1,00 ; -1,00]	0,01
$a_M$	13,5	[0,00 ; 20,00]	0,01
$b_M$	0	[-2,00 ; 2,00]	0,01
$c_M$	0,04	[1,00 ; -1,00]	0,01

L è la lunghezza del treno da considerarsi ai fini della frenatura e deve poter assumere i valori specificati nella seguente tabella.

**Tabella 15 - Parametro L**

Parametro	Valore di prima ipotesi	Valori possibili
L	LD	LD o LT

dove:

- LT è la lunghezza reale del treno inserita dal PdM nei dati treno
- $LD = \begin{cases} L_V & \text{se TipoFreno} = \text{Viaggiatori} \\ L_M & \text{se Tipo di freno} = \text{Merci} \end{cases}$

Dunque, a seconda dei dati di configurazione del rotabile, il valore di lunghezza del treno da utilizzare nel modello di frenatura può essere pari al valore di lunghezza reale inserita dal PdM<sup>21</sup> (LT) o ad un valore di

<sup>21</sup> Personale di macchina

default legato al tipo di freno (LD).

I parametri  $L_V$  e  $L_M$  sono definiti nella seguente tabella:

**Tabella 16 - Parametri  $L_V$  e  $L_M$**

Parametro	Valore di prima ipotesi	Intervallo di definizione	Passo
$L_V$	650	[0 ; 2000]	25
$L_M$	1000	[0 ; 2000]	25

#### 4.2.3 CALCOLO DI $d_i$

Il valore di decelerazione dovuta alla pendenza della linea è data da

$$d_i = \begin{cases} K_{i1} * g * i & \text{se } i > i_1 \\ K_{i2} * g * i & \text{se } i_2 < i \leq i_1 \\ K_{i3} * g * i & \text{se } i \leq i_2 \end{cases}$$

dove:

- $g$  è l'accelerazione di gravità, pari a  $9,81 \text{ m/s}^2$ ;
- $i$  è la pendenza sicura della linea, espressa come numero puro, positiva in salita;
- I coefficienti  $K_{i1}$ ,  $K_{i2}$  e  $K_{i3}$  e le soglie  $i_1$  e  $i_2$  sono utilizzate per contemplare il contributo delle inerzie dovute alle masse rotanti. I valori sono definiti in tabella:

**Tabella 17 - Parametri per il calcolo di  $d_i$**

Parametro	Valore di prima ipotesi	Intervallo di definizione	Passo
$K_{i1}$	0,90	[0,8 ; 1,00]	0,01
$K_{i2}$	1	[0,8 ; 1,00]	0,01
$K_{i3}$	1,1	[0,8 ; 1,00]	0,01

$i_1$	0,0	[0,0 ; 0,035]	0,001
$i_2$	-0,021	[- 0,035 ; 0,0]	0,001

#### 4.2.4 CALCOLO DI $d_p$

Il valore di decelerazione costante, dovuto alla frenatura, utilizzato dal modello nella fase di frenatura a regime è:

$$d_p = K_0 * K_c * K_r * d_r$$

dove:

- $K_0$  è un coefficiente di protezione rispetto alle velocità obiettivo non nulle;
- $K_c$  è un coefficiente di correzione per velocità elevate;
- $K_r$  è un coefficiente di protezione che tiene conto della dispersione delle prestazioni frenanti intorno al valore medio ed è legato alle prestazioni garantite dal materiale rotabile;
- $d_r$  è il valore di decelerazione nominale legato alla percentuale di massa frenata del treno.

#### 4.2.5 CALCOLO DI $K_0$

Risulta:

$$K_0 = 1 - c_r * \frac{V_0}{V}$$

dove:

- $V$  e  $V_0$  sono le velocità iniziale e obiettivo;
- $c_r$  è definito nella seguente tabella:

**Tabella 18 - Parametro  $c_r$**

Parametro	Valore di prima ipotesi	Intervallo di definizione	Passo
$c_r$	0,05	[0,00 ; 0,10]	0,01

#### 4.2.6 CALCOLO DI $K_C$

Risulta:

$$K_C = \begin{cases} 1 & \text{se } V \leq V_C \\ 1 + n_C * (V - V_C) & \text{se } V > V_C \end{cases}$$

I valori dei parametri  $n_C$  e  $V_C$  sono definiti nella seguente tabella:

**Tabella 19 - Parametri  $n_C$  e  $V_C$**

Parametro	Valore di prima ipotesi	Intervallo di definizione	Passo
$n_C$	0,008	[-0,010 ; 0,010]	0,001
$V_C$	170 km/h	[0; 400]	5

#### 4.2.7 DEFINIZIONE DI $K_r$

Risulta:

**Tabella 20 - Parametro  $K_r$**

Parametro	Valore di prima ipotesi	Intervallo di definizione	Passo
$K_r$	1,50	[1; 2,5]	0,01

#### 4.2.8 CALCOLO $d_r$

Risulta:

$$d_r = \begin{cases} A * \lambda + B & \text{se } V \leq V_L \\ (A * \lambda + B) * [1.55 - C * (V - V_L)] & \text{se } V > V_L \end{cases}$$

dove:

- $V_L = x * \lambda^y$
- I valori di A, B, C, x, y sono dati nella seguente tabella:

**Tabella 21 - Parametri per il calcolo di  $d_f$**

Parametro	Valore di prima ipotesi	Intervallo di definizione
A	0,00685	Reale
B	0,094	Reale
C	0,00756	Reale
x	4,492	Reale
y	0,443	Reale

#### 4.2.9 DEFINIZIONE DI $V_\beta$

La velocità  $V_\beta$  caratterizza il comportamento del treno nella fase transitoria, durante la quale il modello assume che nessuna forza frenante sia applicata alle ruote.

Risulta:

$$V_\beta = \begin{cases} V - d_i * (t_f + h) & \text{se } V - d_i * (t_f + h) > V_0 \\ V_0 & \text{se } V - d_i * (t_f + h) \leq V_0 \end{cases}$$

$V$  e  $V_0$  sono la velocità iniziale e obiettivo

## 5. APPARATI CENTRALI

L'adozione di un apparato centrale comporta non solo un aumento della sicurezza, in quanto non più affidata alla sola attenzione e serietà degli operatori, ma anche una notevolissima riduzione dei costi del personale. Vale la pena sottolineare che la sicurezza derivante da un apparato centrale non è dovuta solo alla possibilità di effettuare una manovra una volta verificate una serie di condizioni, ma anche alla possibilità di ricevere risposta dagli enti di piazzale alla richiesta di controllo inviata dall'apparato.



**Figura 50 - Esempio di sala di controllo per la supervisione della circolazione ferroviaria**

Gli apparati centrali possono essere distinti in base all'energia con cui vengono realizzate le manovre ed in base al livello di automazione delle fasi di sicurezza. In base all'energia impiegata per le manovre si distinguono:

- Apparati meccanici;
- Apparati idrodinamici;
- Apparati elettrici.

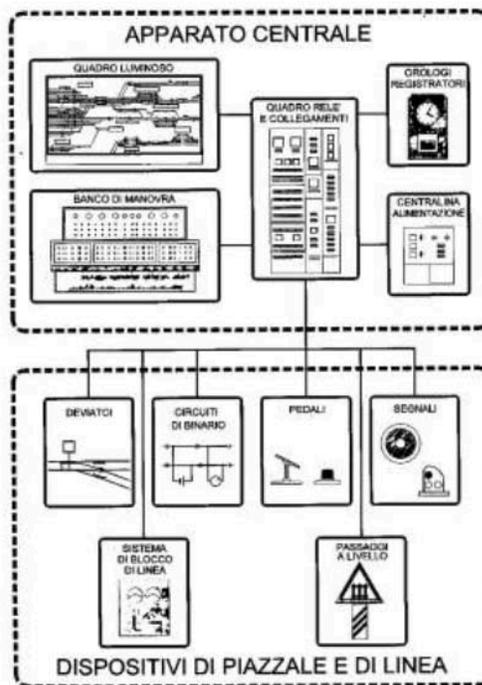
Attualmente sono utilizzati solo apparati centrali elettrici.

Un apparato centrale elettrico è costituito dai seguenti elementi:

- *Banco di manovra*: è l'elemento che consente l'interfaccia tra l'operatore, i dispositivi di comando e verifica e gli enti di piazzale. Il banco di manovra è ubicato nell'Ufficio Movimento

della stazione;

- *Quadro luminoso*: riproduce su un pannello il piano schematico della stazione e fornisce costantemente informazioni sull'aspetto dei segnali e lo stato dei binari;
- *Armadio dei Relè e dei Collegamenti*: è l'unità che realizza i collegamenti elettrici tra il banco di manovra e gli enti di piazzale e linea. L'armadio generalmente è posto in un locale attiguo all'Ufficio Movimento, definito *sala relè*, in quanto può raggiungere dimensioni notevoli a causa dell'elevato numero di relè;
- *Orologi registratori*: memorizzano lo stato di particolari enti in funzione dell'orario, come l'aspetto di segnali o lo stato di circuiti di binario, e lo stato dispositivi, come la posizione delle leve di manovra dei deviatori;
- *Centralina di alimentazione e riserva*: provvede all'alimentazione elettrica dell'apparato e dei dispositivi anche nel caso di interruzione dell'alimentazione di rete mediante motore diesel.



**Figura 51 - Schema di funzionamento di un apparato centrale**

È possibile, inoltre, adottare un criterio di classificazione degli apparati centrali basato sul livello di automazione per lo svolgimento delle manovre. Esso comprende:

- Apparat Centrali Elettrici a leve singole (ACE);
- Apparat Centrali Elettrici a pulsanti di Itinerario (ACEI);
- Apparat Centrali Statici (ACS);
- Apparat Centrali Statici Multistazione (ACSM).

## 5.1 APPARATI CENTRALI ELETTRICI A LEVE SINGOLE

In un *apparato centrale elettrico a leve singole* ogni manovra viene svolta azionando una specifica leva. Tutte le leve sono disposte su un banco di manovra la cui lunghezza è funzione del numero di leve; dimensioni orientative di un banco di manovra sono 1.25x0.80x1.00 m. Il banco di manovra è montato in un locale adiacente al fabbricato viaggiatori definito *cabina* con il suo asse maggiore parallelo ai binari. Se la linea è dotata di un blocco elettrico manuale, sul banco di manovra sono posizionati anche gli strumenti di blocco.

I circuiti elettrici utilizzati per la verifica delle condizioni di sicurezza vengono raggruppati in appositi armadi che, a seconda delle dimensioni, possono essere disposti nell'Ufficio Movimento, in cui vi è anche la cabina, o nella sala relè.

Il quadro luminoso di un ACE è costituito da una lastra di vetro su cui sono rappresentati schematicamente il piazzale e i binari: vi sono spie colorate che riproducono l'aspetto dei segnali e serie di lampadine dietro il cristallo la cui accensione o spegnimento indica lo stato di eccitazione dei relè corrispondenti ai circuiti di binario.

L'apparato centrale elettrico è alimentato dalla centralina di alimentazione e riserva posta, in genere, nella sala relè.



**Figura 52 - Banco di manovra di un Apparato Centrale Elettrico a leve singole**

## 5.2 APPARATI CENTRALI ELETTRICI A PULSANTI DI ITINERARIO

Con un ACEI il comando di un itinerario o di un istradamento è realizzato mediante l'azionamento di un solo pulsante: ogni ente impegnato è manovrato automaticamente dai dispositivi dell'apparato.

Considerando le fasi per l'inoltro di un convoglio su di un itinerario, solo la prima cioè "formazione dell'itinerario" è manuale, mentre tutte le successive sono automatiche.

Ogni pulsante può assumere tre posizioni diverse:

- Posizione di *riposo*: in automatico il pulsante torna in questa posizione se non premuto;
- Pulsante *premuta*: per iniziare la formazione di un itinerario l'operatore preme il pulsante

corrispondente;

- Pulsante *estratto*: l'operatore può decidere di annullare una manovra appena iniziata estraendo il pulsante.

La tecnologia con cui è realizzato un ACEI è definita *a logica cablata*: le condizioni di sicurezza sono realizzate attraverso un insieme di relè interconnessi tramite conduttori elettrici (cablaggi). Ad esempio, la libertà della via di un itinerario è associata alla circolazione di corrente in un circuito in cui vi sono una serie di interruttori elettrici (relè) collegati ai circuiti di binario: se il circuito di binario è libero e, quindi, il corrispondente relè è eccitato, il relè si porta in posizione tale da consentire la circolazione della corrente nel circuito di verifica della libertà della via. Tutti i relè di tutti i circuiti di binario impegnati dall'itinerario sono disposti in serie in modo che solo nel caso in cui tutti siano liberi, e quindi tutti i relè eccitati, può circolare la corrente nel circuito di verifica.

Un'ulteriore condizione di sicurezza, esclusivamente consentita da un ACEI, è il cosiddetto *comando perduto* grazie al quale il comando impartito dalla pressione del pulsante viene registrato solo se le condizioni di sicurezza richieste sono soddisfatte; in caso contrario il comando si cancella automaticamente e l'apparato non ne conserva memoria.

Per quanto riguarda le componenti dell'apparato centrale a pulsanti di itinerario è anch'esso dotato di un banco di manovra e di alcuni armadi ACEI.



**Figura 53 - Banco di manovra ed armadio di un ACEI**

### **5.3 APPARATI CENTRALI STATICI**

Un *apparato centrale statico* costituisce un esempio dell'elevato livello tecnologico oggi raggiunto nel settore degli impianti di sicurezza per la circolazione.

Infatti, un ACS consente, oltre che di gestire la circolazione in sicurezza, di affrontare gli eventi di disturbo alla circolazione stessa, come ritardi, modifiche di orario, soppressioni di treni, minimizzando le ripercussioni negative sulla fluidità e regolarità. Infatti, nelle grandi stazioni l'ACS è collegato ad un sistema cosiddetto di *Supervisione* dal quale attinge gli orari e tutte le informazioni necessarie per ottimizzare la circolazione in caso di eventi perturbativi.

L'adozione di un tale impianto consente di elevare il livello del servizio di trasporto offerto agli utenti sia dal punto di vista qualitativo che quantitativo. La tecnologia impiegata in un ACS permette di garantire una maggiore regolarità dell'esercizio limitando, se non azzerando, gli errori nella regolazione del traffico. Inoltre, la rapidità con cui viene ripristinata ed ottimizzata la circolazione in caso di guasto consente di arginare le ripercussioni sulla regolarità.

La logica computerizzata fa aumentare la potenzialità di una linea in quanto riduce i ritardi ed è in grado di gestire in modo rapido, sicuro ed ottimale un sistema, costituito da stazioni e tratti di piena linea, anche se molto complesso.

Entrando nello specifico della tecnologia, è da specificare innanzitutto che l'ACS è un apparato che usa una tecnologia *a logica programmata*: le varie funzioni di comando e controllo sono realizzate mediante un insieme di specifici programmi software e tutti gli enti di stazione, attraverso i quali è gestita la circolazione ferroviaria, sono sottoposti al controllo di uno o più elaboratori (detti anche *calcolatori*) a logica programmata.

Schematicamente l'architettura dell'impianto prevede:

- Un unico **Posto Centrale** dal quale vengono impartiti i comandi;
- Uno o più **Posti Periferici**, installati in diversi punti della linea, che permettono di attuare la manovra degli enti, il controllo del loro stato e la diagnostica di eventuali guasti;
- Gli **Enti di Piazzale** (deviatori, segnali fissi luminosi, circuiti di binario, ecc.) con i relativi comandi ai posti periferici.

## 5.5 APPARATI CENTRALI STATICI MULTISTAZIONE (ACMS)

L'*apparato centrale statico multistazione* costituisce, attualmente, la modalità più efficace di gestione della circolazione.

In un ACSM esiste un unico posto centrale a cui fanno riferimento tutti i posti periferici collocati ciascuno in una stazione. L'ACSM, dunque, controlla e comanda sia un'area estesa, in cui vi sono i posti periferici (attraverso controllori di area e controllori di ente), che tutti i dispositivi di linea.

Dal posto centrale è possibile svolgere tutte le funzioni che riguardano sia la circolazione in piena linea che in stazione, gestire la diagnostica dei componenti, gli allarmi e le situazioni di degrado. Nell'Ufficio Movimento del posto centrale di un ACSM è presente un quadro luminoso a retroproiezione che riproduce le condizioni degli enti di linea e delle stazioni da esso gestite.

## 6. RETE FERROVIARIA EUROPEA

### 6.1 VERSO L'INTEROPERABILITÀ FERROVIARIA EUROPEA

Il processo di unificazione della rete ferroviaria in Europa è indicato già nella direttiva del Consiglio Europeo del 29 luglio 1991 "Relativa allo sviluppo delle ferrovie comunitarie (91/440/CEE)". Con questa direttiva viene, infatti, evidenziata la necessità di adeguare le reti ferroviarie degli stati membri alle esigenze del mercato unico, al fine di consentire una maggiore integrazione del settore comunitario dei trasporti; questa condizione è ritenuta essenziale per il processo di unificazione europea, sia per gli aspetti di mercato che per quelli sociali.

La costituzione e lo sviluppo di reti di trasporto trans-europee è sancita nel Titolo XI del Trattato di Maastricht del 29 Luglio 1992, in cui agli articoli 129 B e 129 C si legge:

*"Articolo 129 B*

- 1. Per contribuire al raggiungimento degli obiettivi di cui agli articoli 7 A e 130 A e per consentire ai cittadini dell'Unione, agli operatori economici e alle collettività regionali e locali di beneficiare pienamente dei vantaggi derivanti dall'instaurazione di uno spazio senza frontiere interne, la Comunità concorre alla costituzione e allo sviluppo di reti trans-europee nei settori delle infrastrutture dei trasporti, delle telecomunicazioni e dell'energia.*
- 2. Nel quadro di un sistema di mercati aperti e concorrenziali, l'azione della Comunità mira a favorire l'interconnessione e l'interoperabilità delle reti nazionali, nonché l'accesso a tali reti. Essa tiene conto in particolare della necessità di collegare alle regioni centrali della Comunità le regioni insulari, prive di sbocchi al mare e periferiche.*

*Articolo 129 C*

- 1. Per conseguire gli obiettivi di cui all'articolo 129 B, la Comunità:*
  - stabilisce un insieme di orientamenti che contemplino gli obiettivi, le priorità e le linee principali delle azioni previste nel settore delle reti trans-europee; in detti orientamenti sono individuati progetti di interesse comune;*
  - intraprende ogni azione che si riveli necessaria per garantire l'interoperabilità delle reti, in particolare nel campo dell'armonizzazione delle norme tecniche;*
  - può appoggiare gli sforzi finanziari degli Stati membri per progetti d'interesse comune finanziati dagli Stati membri e individuati nell'ambito degli orientamenti di cui al primo trattino, in particolare mediante studi di fattibilità, garanzie di prestito o abbuoni d'interesse; la Comunità può altresì contribuire al finanziamento negli Stati membri, mediante il Fondo di coesione da istituire entro e non oltre il 31 dicembre 1993 conformemente all'articolo 130 D, di progetti specifici nel settore delle infrastrutture dei trasporti.*

*L'azione della Comunità tiene conto della potenziale validità economica dei progetti.*

2. *Gli Stati membri coordinano tra loro, in collegamento con la Commissione, le politiche svolte a livello nazionale che possono avere un impatto rilevante sulla realizzazione degli obiettivi di cui all'articolo 129 B. La Commissione può prendere, in stretta collaborazione con gli Stati membri, qualsiasi iniziativa utile per favorire detto coordinamento.*
3. *La Comunità può decidere di cooperare con i paesi terzi per promuovere progetti di interesse comune e garantire l'interoperabilità delle reti.”*

A seguito del Trattato, per quanto riguarda le reti ferroviarie, furono emesse diverse Direttive Europee, in cui veniva prima definita l'interoperabilità delle reti di alta velocità (Direttiva 96/48/CE del Consiglio del 23 luglio 1996), poi l'interoperabilità delle linee convenzionali (Direttiva 2001/16/CE del Parlamento europeo e del Consiglio del 19 marzo 2001), fino ad arrivare alla Direttiva 2008/57/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio dell'Unione Europea in cui l'interoperabilità per la rete ferroviaria trans-europea viene definita con chiarezza (all'Articolo 2):

*“«interoperabilità»: la capacità del sistema ferroviario di consentire la circolazione sicura e con soluzione di continuità di treni effettuando le prestazioni specificate.*

*Tale capacità si fonda sull'insieme delle prescrizioni regolamentari, tecniche ed operative che debbono essere soddisfatte per ottemperare ai requisiti essenziali;”*

Inoltre in quest'articolo della direttiva vengono definite anche le Specifiche Tecniche di Interoperabilità:

*“«specifiche tecniche di interoperabilità» («STI»): una specifica adottata norma della presente direttiva di cui è oggetto ciascun sottosistema o parte di sottosistema, al fine di soddisfare i requisiti essenziali e garantire l'interoperabilità del sistema ferroviario.”*

Vengono cioè definite un insieme di norme armonizzate per individuare standard tali da permettere una omogeneizzazione della rete e dei servizi ferroviari offerti.

Il 28 marzo 2006 la Commissione Europea nella 2006/679/CE ha parlato, per la prima volta, di installazione a posteriori (cioè non su una nuova linea) del sistema ERTMS in sei “corridoi” ferroviari.

## **6.2 TRANS-EUROPEAN NETWORKS – TRANSPORT E CORRIDOI EUROPEI**

Le Trans-European Networks –Transport, più comunemente denominate con l'acronimo TEN-T, sono le reti di trasporto trans-europee e sono parte di un più ampio sistema di reti trans-europee (TEN) che comprendono anche le “reti di telecomunicazioni trans-europee” (eTEN) e le “reti energetiche trans-europee” (TEN-E).

Le TEN-T comprendono:

- la rete stradale trans-europea;
- la rete ferroviaria trans-europea (che a sua volta include sia la rete ferroviaria convenzionale trans-europea che la rete ferroviaria ad alta velocità trans-europea);
- la rete fluviale trans-europea e porti per la navigazione interna;

- la rete di porti marittimi trans-europea;
- la rete marittima trans-europea (detta anche “autostrade del mare”);
- la rete aeroportuale trans-europea;
- la rete combinata di trasporto trans-europea;
- la rete di gestione del traffico aereo trans-europea che comprende il Single European Sky e i concetti di ricerca ATM sul Single European Sky;
- la rete di posizionamento e navigazione satellitare trans-europea.

In questo contesto l’Unione Europea ha compilato <sup>22</sup> una lista di 30 progetti prioritari da realizzare prima del 2020. Questi progetti intendono consentire la formazione di corridoi trans-europei di trasporto e costituiscono un importante passo per la mobilità in Europa.

In particolare la Commissione Europea ha individuato sei corridoi ferroviari prioritari, costituiti dalle maggiori linee ferroviarie europee, sottolineandone l’importanza al punto che, nella valutazione intermedia dei progetti del programma pluriennale 2007-2013 per la rete TEN-T della Commissione europea (MEMO/10/526 del 27/10/2010), viene evidenziato come il 70% dei progetti riguardi la rete ferroviaria ed essi costituiscano l’81% degli investimenti complessivi. Questi corridoi ferroviari sono:

- Corridoio A: Rotterdam – Genova;
- Corridoio B: Stoccolma – Napoli;
- Corridoio C: Anversa – Basilea;
- Corridoio D: Lubiana – Valencia;
- Corridoio E: Dresda – Budapest;
- Corridoio F: Aquisgrana – Terespol.

Nei successivi paragrafi si evidenziano le principali caratteristiche che le reti ferroviarie devono possedere per essere “interoperabili”, ovvero garantire ai convogli di qualsiasi Paese il transito su tutte le reti dei diversi Stati nazionali membri dell’Unione Europea.

---

<sup>22</sup> Nella decisione numero 884/2004/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio del 29 aprile 2004 che modifica la decisione n. 1692/96/CE sugli orientamenti comunitari per lo sviluppo della rete trans-europea dei trasporti

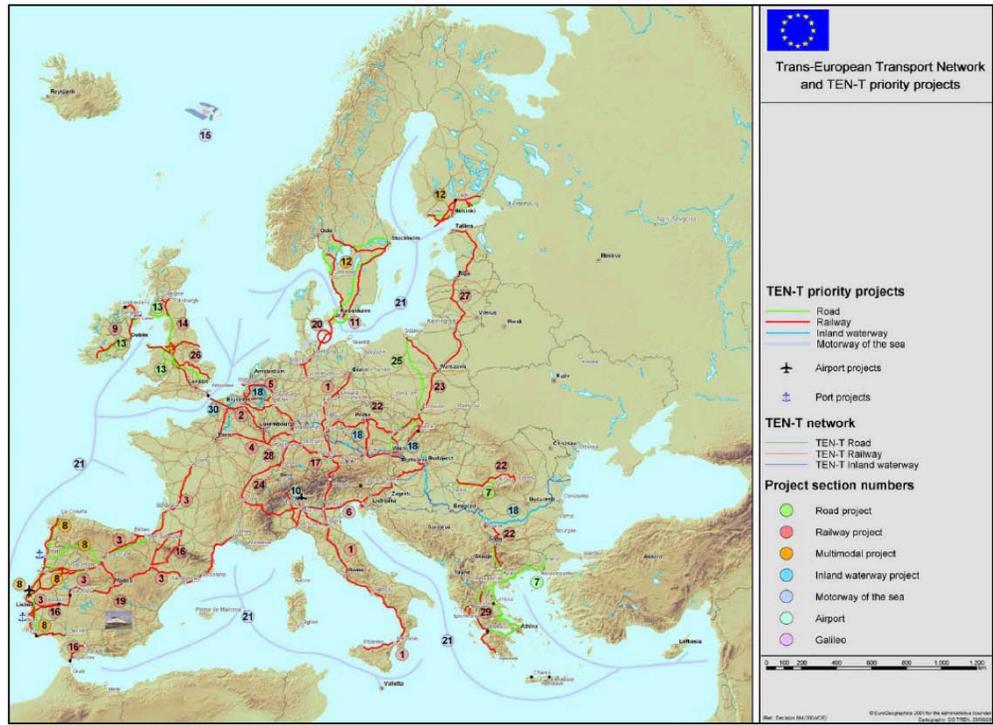
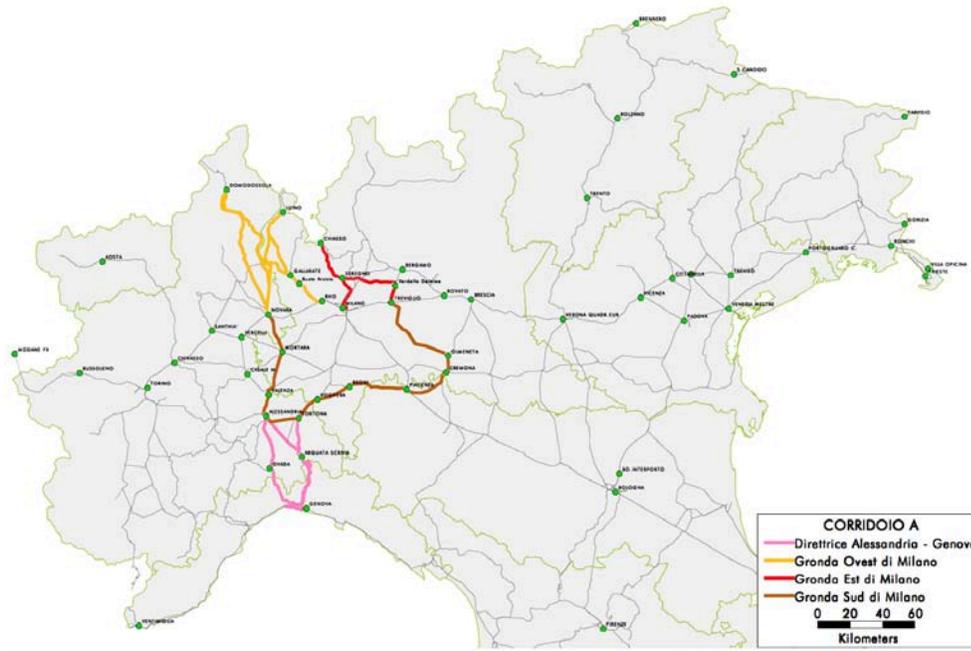


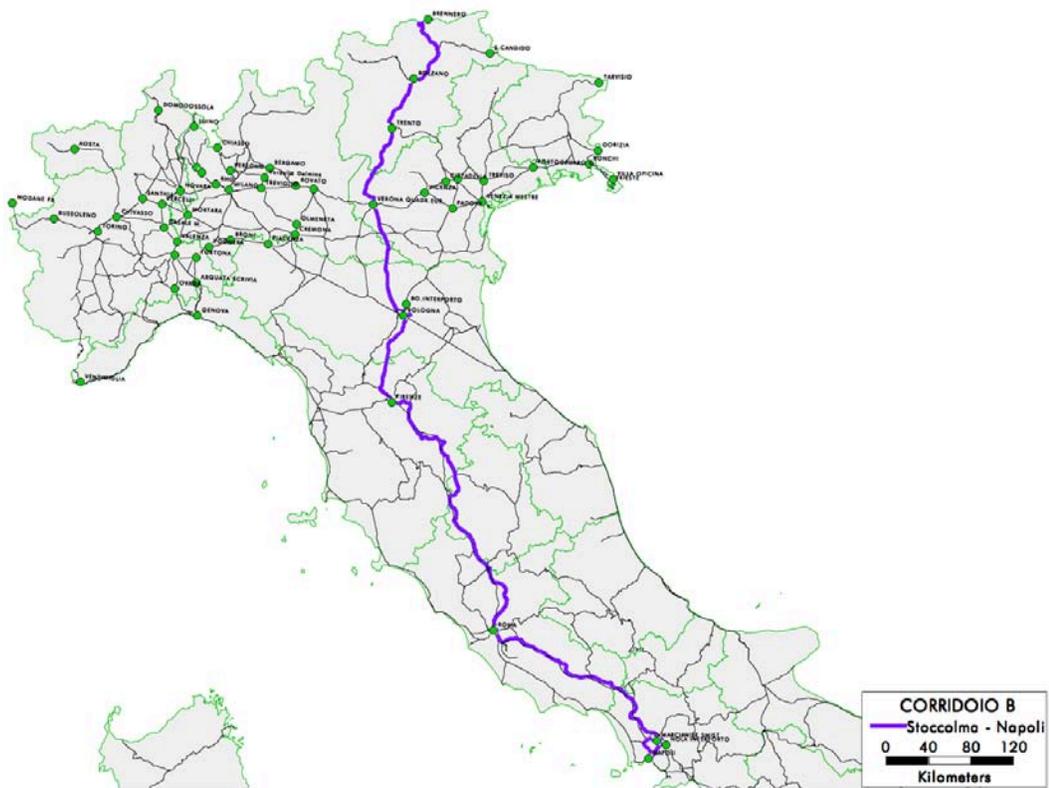
Figura 54 - Corridoi Europei TEN-T



Figura 55 - Corridoi ferroviari europei

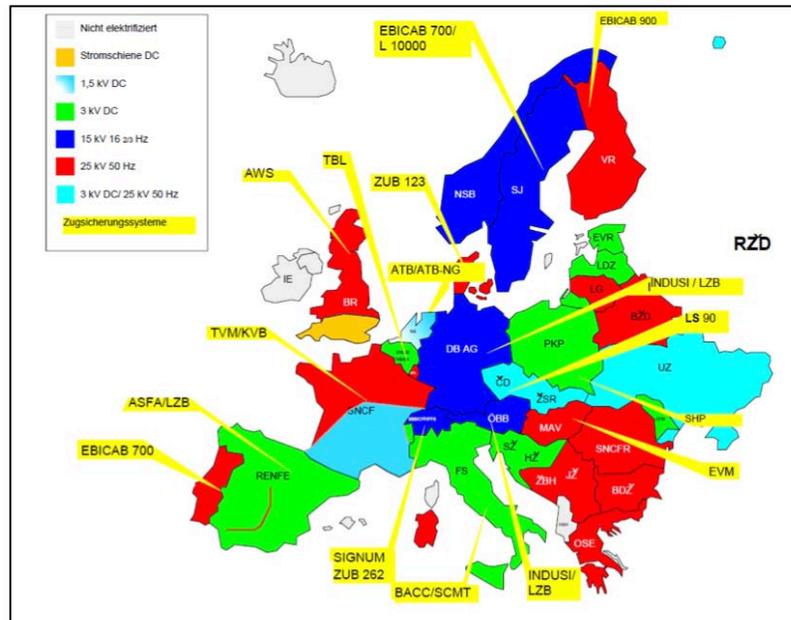


**Figura 56 - Tratta italiana del corridoio A**



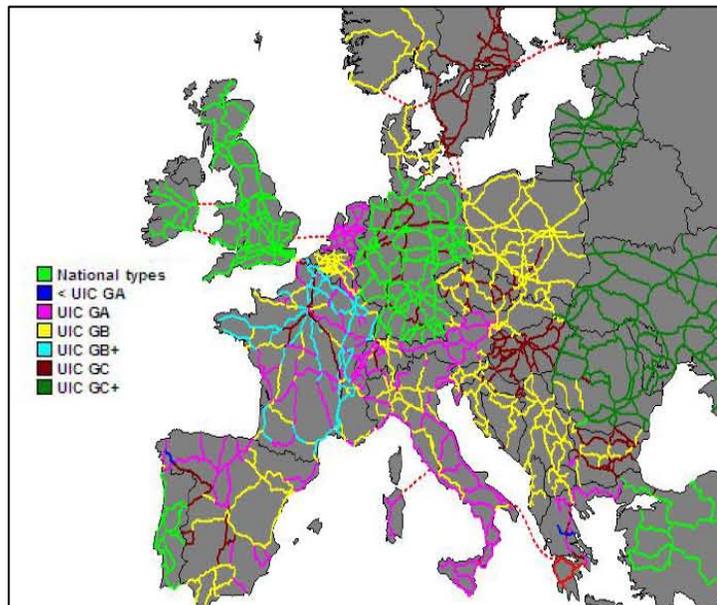
**Figura 57 - Tratta italiana del corridoio B**





**Figura 59 - Sistemi di alimentazione in Europa**

Dato che i sistemi di alimentazione utilizzati in Europa sono essenzialmente tre (3kV CC, 25kV AC a 50Hz e 15kV AC a 16+2/3 Hz), i problemi legati al diverso tipo di alimentazione dei sistemi di trazione si risolvono abbastanza facilmente equipaggiando il locomotore con un pantografo per ciascun sistema, che si collega al gruppo di trazione del treno mediante un diverso circuito di conversione.



**Figura 60 - Gabarit in Europa**

I gabarit nei vari sistemi europei differiscono di poco; basterà rimanere al di sotto del gabarit più restrittivo (UIC GA) perché i treni possano circolare in tutte le linee.

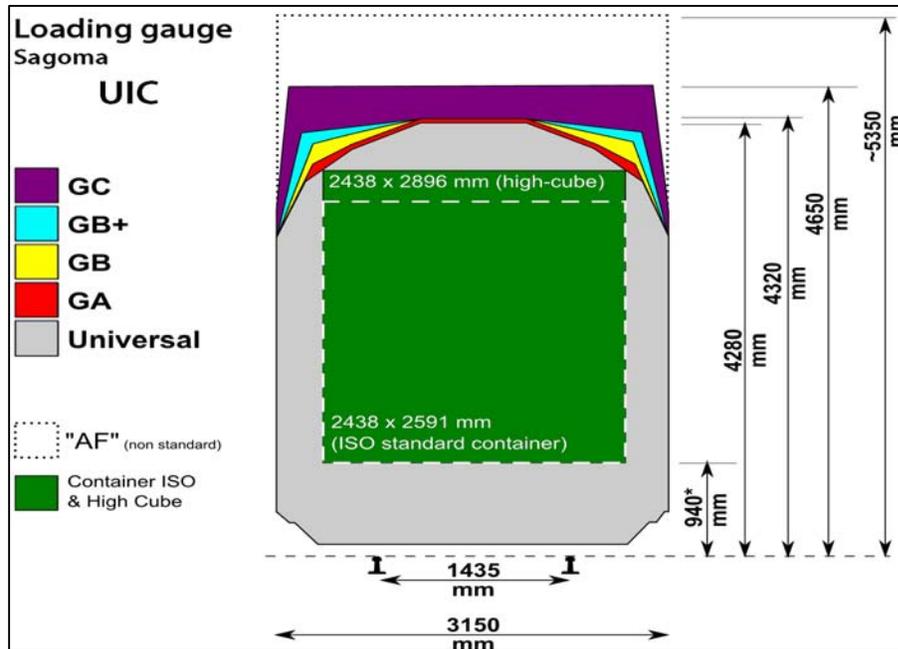


Figura 61 - Diversi standard UIC per il gabarit

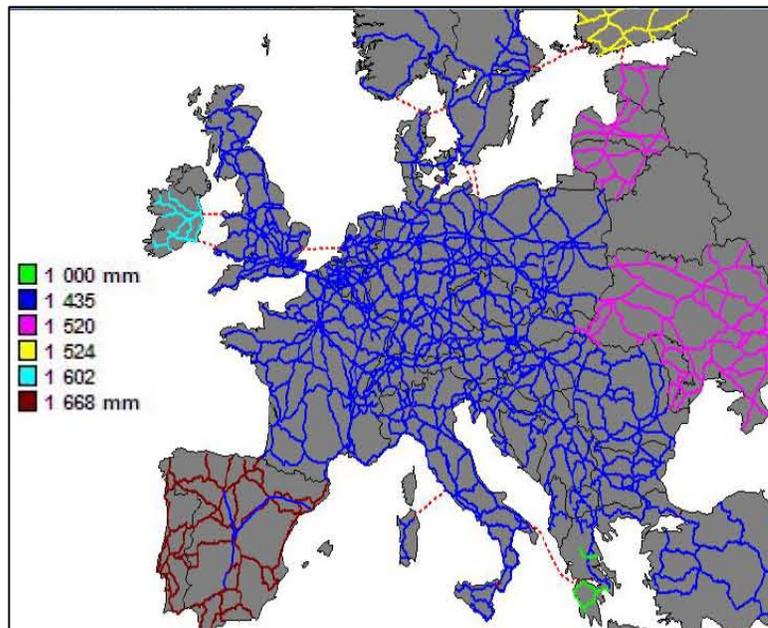
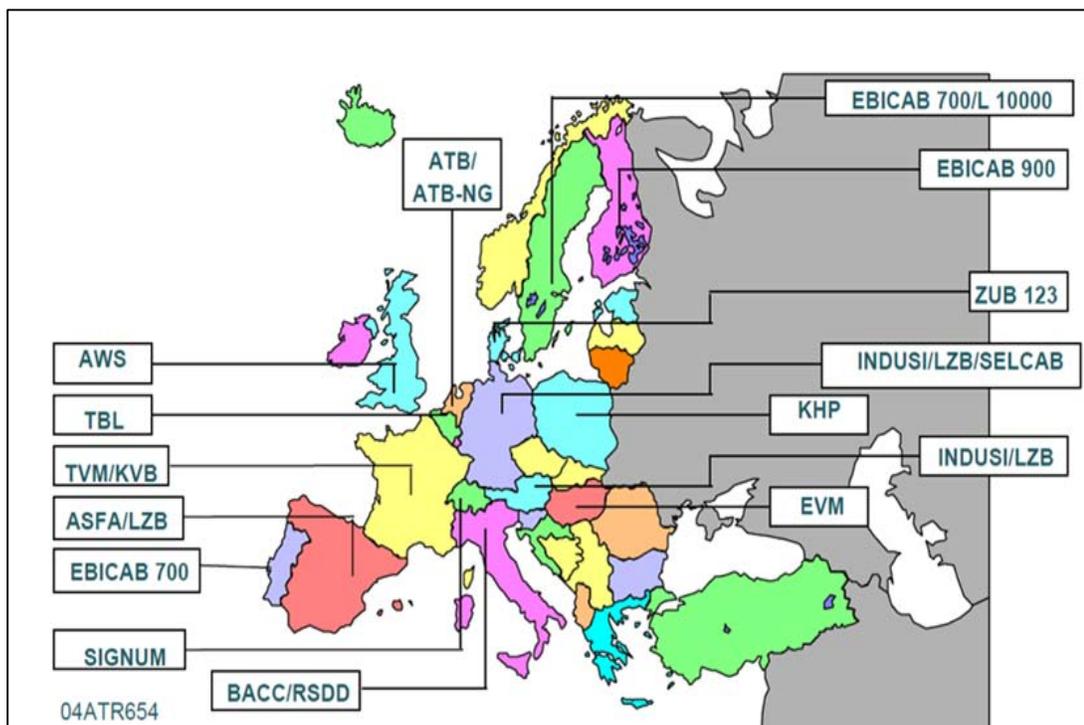


Figura 62 - Scartamento in Europa

Per quanto riguarda lo scartamento, fatta eccezione che per alcuni paesi, in Europa è largamente adottato lo scartamento standard di 1435 mm. Dove lo scartamento è diverso, come ad esempio in Spagna e in Portogallo, c'è bisogno necessariamente di costruire nuove linee per convogli dedicati al trasporto verso le altre reti ferroviarie europee.



**Figura 63 - Sistemi di segnalamento in Europa**

Per quanto riguarda infine i sistemi di segnalamento delle reti storiche in Europa la situazione risulta più critica, tanto che nella Comunicazione della Commissione Europea “sulla realizzazione del sistema europeo di segnalamento ferroviario ERTMS/ETCS COM(2005) 298 definitivo” del 04/07/2007, si scriveva:

*“Oggi in Europa coesistono oltre venti sistemi diversi di segnalamento e controllo della velocità. Il Thalys, il treno che collega in particolare Parigi e Bruxelles, deve essere dotato di sette sistemi diversi di segnalamento e controllo di velocità, un’esigenza che genera costi aggiuntivi, aumenta i rischi di problemi tecnici e complica il lavoro dei macchinisti che devono conoscere ogni singolo sistema. Queste barriere tecniche ostacolano lo sviluppo del trasporto ferroviario su scala europea, mentre l’assenza di problemi analoghi nel trasporto stradale favorisce lo sviluppo di quest’ultimo settore.”*

E’ dunque un elemento di grande rilevanza per l’Unione Europea definire un sistema comune di segnalamento che permetta un’efficace interoperabilità tra reti nazionali, abbattendo le barriere tecniche tra le reti, al fine di ottenere una reale rete ferroviaria unica trans-europea.

## 7. ERTMS - European Rail Traffic Management System/European Train Control System

I sistemi di segnalamento e controllo della marcia dei treni garantiscono prestazioni sempre più elevate e complesse. Fino ad oggi questi sistemi sono stati sviluppati generalmente a livello nazionale, per un'industria o per un cliente specifico; di conseguenza, essi differiscono da stato a stato, specialmente per ciò che riguarda le modalità di trasmissione delle informazioni e la natura delle notizie trasmesse. Esistono in Europa più di venti sistemi di segnalamento e di controllo della velocità e, per la maggior parte, sono totalmente incompatibili tra di loro. Questo comporta, per esempio, che un treno in servizio internazionale come il Thalys, che ogni giorno attraversa Parigi, Bruxelles, Colonia ed Amsterdam, debba essere attrezzato con non meno di sette sistemi differenti e abbia un elevato numero di sensori e schemi; questo provoca costi supplementari, implica un aumento dei rischi di guasto e comporta una complicazione del lavoro dei conducenti.

Davanti a tale frammentazione del settore, si è fatta progressivamente sentire la necessità di unire gli sforzi e di lavorare a livello europeo, così da evitare che, in ogni Stato membro, fondi importanti fossero destinati allo sviluppo, alle prove e alla convalida di sistemi ferroviari incompatibili tra di loro. All'inizio degli anni '90, vari Stati membri si impegnarono a progettare una nuova generazione di sistemi di segnalamento e di controllo della velocità a più alto rendimento e meno onerosi, approfittando degli immensi progressi delle telecomunicazioni.

Sotto l'impulso della Commissione Europea, questi diversi progetti di ricerca sono stati riuniti e sono confluiti in un grande progetto industriale europeo chiamato l'ERTMS.

L'**European Rail Traffic Management System(ERTMS)**, che è il sistema di segnalamento e controllo della marcia del treno europeo, offre significativi benefici in merito a performance e potenzialità della linea, oltre che migliorare largamente il sistema di sicurezza grazie ad un automatic train protection (ATP). Esso si basa su due componenti fondamentali:

- **European Train Control System (ETCS)**: un sistema di controllo e comando dei treni europeo, frutto del lavoro del European Railway Research Institute (ERRI), che permette di trasmettere al conducente e al sotto sistema di bordo (SSB) le notizie sulla libertà o l'occupazione del binario, sui limiti di velocità imposti e che attua un controllo continuo della velocità istantanea del treno.
- **GSM-R**: frutto del progetto EIRENE<sup>23</sup> del consorzio MORANE<sup>24</sup> che ha sviluppato un sistema di trasmissione via radio per le applicazioni ferroviarie. Esso si basa sugli standard GSM, ma usa frequenze diverse dedicate alle ferrovie e ha funzioni avanzate. Questo sistema radio è usato per scambiare informazioni (sia voce che dati) tra sotto sistema di bordo (SSB) e sotto sistema di terra (SST).

L'ETCS è organizzato in quattro programmi di lavoro:

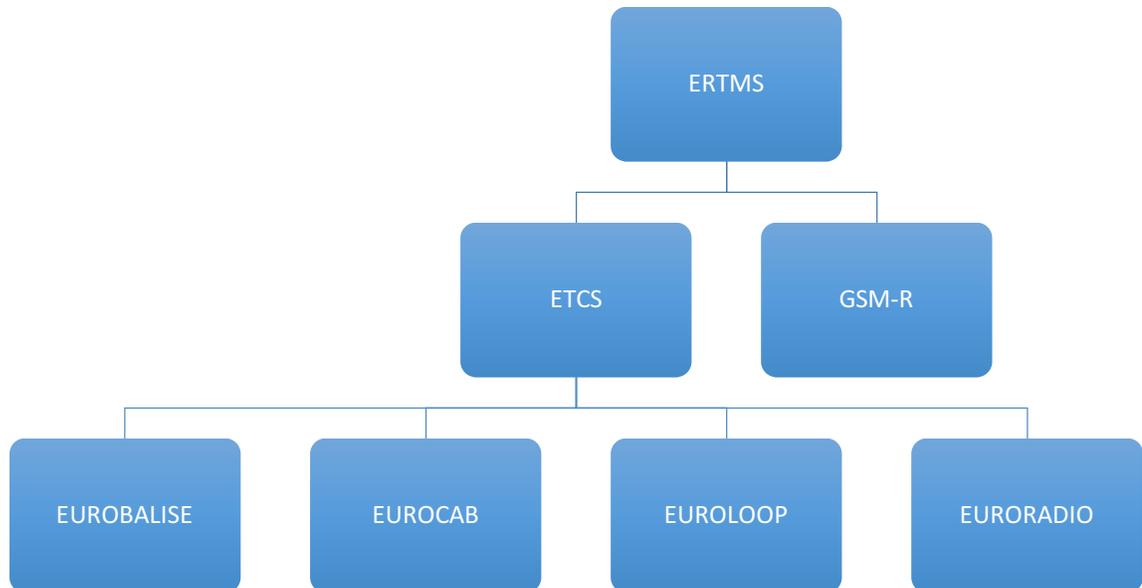
- **EUROBALISE**, che si occupa dello sviluppo di un sistema di comunicazione discontinuo tra terra e treno; la trasmissione avviene al passaggio del treno sopra le boe fisse disposte lungo la linea.
- **EUROCAB**, che si occupa dello sviluppo della strumentazione di bordo comprendente il data bus (*ETCS bus*), il computer vitale EVC (*European Vital Computer*) oltre ad altri dispositivi, moduli ed interfacce.

---

<sup>23</sup> European Integrated Railway radio Enhanced Network

<sup>24</sup> Mobile Radio for Railway Networks in Europe

- **EURORADIO**, che si occupa dello sviluppo di una trasmissione sicura di informazioni tra i livelli applicativi di ETCS, attraverso una interfaccia radio.
- **EUROLOOP**, che si occupa dello sviluppo di una trasmissione semicontinua tra terra e treno.



**Figura 64 - Struttura ERTMS**

Oltre a rispondere alle specifiche tecniche di interoperabilità e consentire la formazione della rete ferroviaria trans-europea, il sistema ERTMS/ETCS è stato pensato per essere la migliore metodologia di controllo del treno al mondo e per questo motivo permette:

- un incremento della potenzialità delle linee esistenti, consentendo così di rispondere alla crescita della domanda nel settore dei trasporti: essendo un sistema di segnalazione basato sulla comunicazione continua, riduce fino al 40% la distanza tra due treni;
- più alte velocità: fino a 500 km/h;
- tassi di affidabilità più elevati;
- minori costi di produzione;
- minori costi di mantenimento poiché elimina la segnaletica laterale ad alcuni livelli di equipaggiamento.

Uno dei maggiori pregi del sistema ERTMS/ETCS è quello di essere basato su specifiche tecniche di dominio pubblico. Esse assicurano l'interoperabilità dell'attrezzaggio ETCS anche con componenti prodotti da diversi fornitori e lasciano inoltre a questi ultimi la scelta della tecnologia migliore.

Il sistema ERTMS/ETCS opera a 4 diversi livelli di equipaggiamento della linea e del treno, ognuno dei quali, dal livello 0 al livello 3, aumenta maggiormente la potenzialità e la sicurezza.

Con i sistemi ERTMS/ETCS, ad ogni livello di attrezzaggio, la velocità dei treni è continuamente monitorata dall'SSB; nel caso in cui il treno superi la velocità massima ammessa dalla MA il computer dell'SSB comanda automaticamente l'intervento del freno.

Nei capitoli che seguono sono esposti nel dettaglio le diverse caratteristiche dei livelli di equipaggiamento previsti dalle direttive europee.

## **7.1 EUROBALISE**

Una balise, o boa, è un dispositivo fondamentale per diversi sistemi di segnalamento in quanto fornisce indicazioni sulla posizione del treno.



**Figura 65 - Alcune balise installate lungo i binari**

Essendo le balise dei transponder di tipo passivo, trasmettono i propri dati solo al passaggio del treno, quando vengono energizzate dal campo elettromagnetico prodotto dall'antenna posta a bordo del rotabile. I dati trasmessi in forma digitale sono denominati telegrammi; le boe possono dare un'informazione fissa, ovvero sono preprogrammate con un unico set di dati, oppure variabile, ad esempio a seconda degli aspetti dei segnali luminosi.

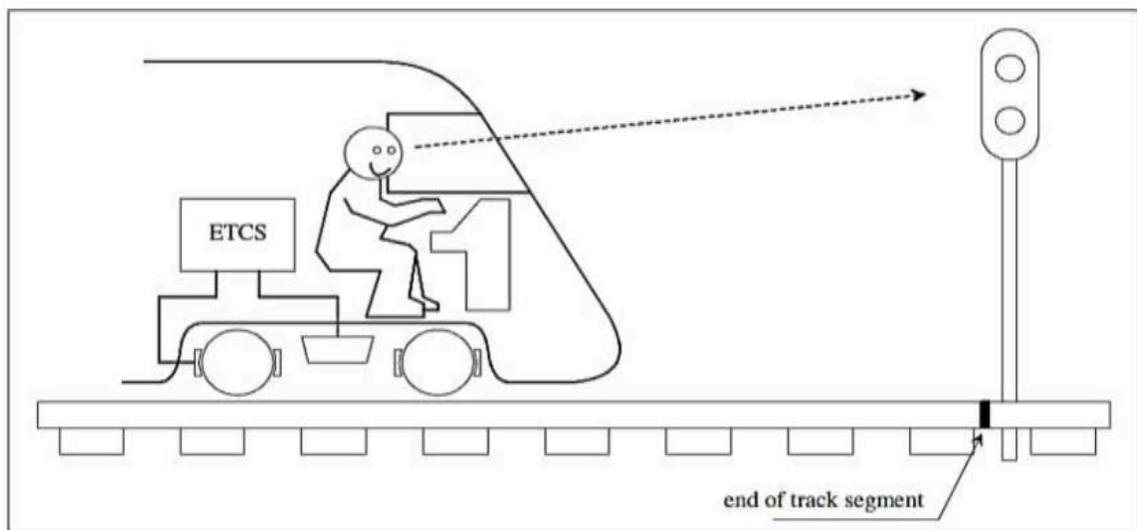


**Figura 66 - Trasmissione del telegramma tra Eurobalise e antenna del rotabile**

## 7.2 ETCS Livello 0

Il livello 0 viene definito come una condizione operativa in cui un treno attrezzato con ERTMS/ETCS marcia su una linea non attrezzata con ERTMS/ETCS. In tale circostanza i dispositivi del segnalamento di terra non riescono ad interfacciarsi con il sottosistema di bordo e, quindi, la marcia è regolata osservando i segnali luminosi e il distanziamento dei treni avviene mediante il sistema di blocco esistente sulla linea.

Dal momento che l'aspetto dei segnali assume diversi significati da linea a linea, questo livello obbliga il cambio di macchinista nel passaggio da una rete nazionale ad un'altra.



**Figura 67 - ETCS di livello 0**

### 7.3 ETCS Livello 1

Il livello 1 viene definito come una condizione operativa in cui un treno dotato di sistema ERTMS/ETCS viaggia su una linea attrezzata con boe del tipo *Eurobalise* oppure circuiti di binario del tipo *Euroloop* oppure sistema *Radio infill*.

L'ETCS livello 1 prevede un segnalamento con trasmissione discontinua ed attua il distanziamento con blocco fisso; pertanto, la linea è suddivisa in sezioni di blocco.

L'aspetto del segnale ed i dati del tracciato sono trasmessi al veicolo tramite antenne passive poste sulle traverse dei binari e definite dallo standard ETCS *Eurobalise*. L'aspetto di ciascun segnale di linea è captato e codificato in telegramma da un adattatore definito *Lineside Electronics Unit (LEU)*, posto in prossimità del segnale luminoso.

In base a questi dati trasmessi dalla boa, il computer di bordo calcola la curva di frenatura che, una volta visualizzata sul cruscotto, permette all'operatore di bordo di regolare la marcia. Poiché viene utilizzata la trasmissione di tipo discontinuo, il convoglio deve transitare sulla relativa *Eurobalise* per poter ricevere un'informazione aggiornata.

Esistono due varianti del livello operativo 1: con funzione *infill* e senza funzione *infill*.

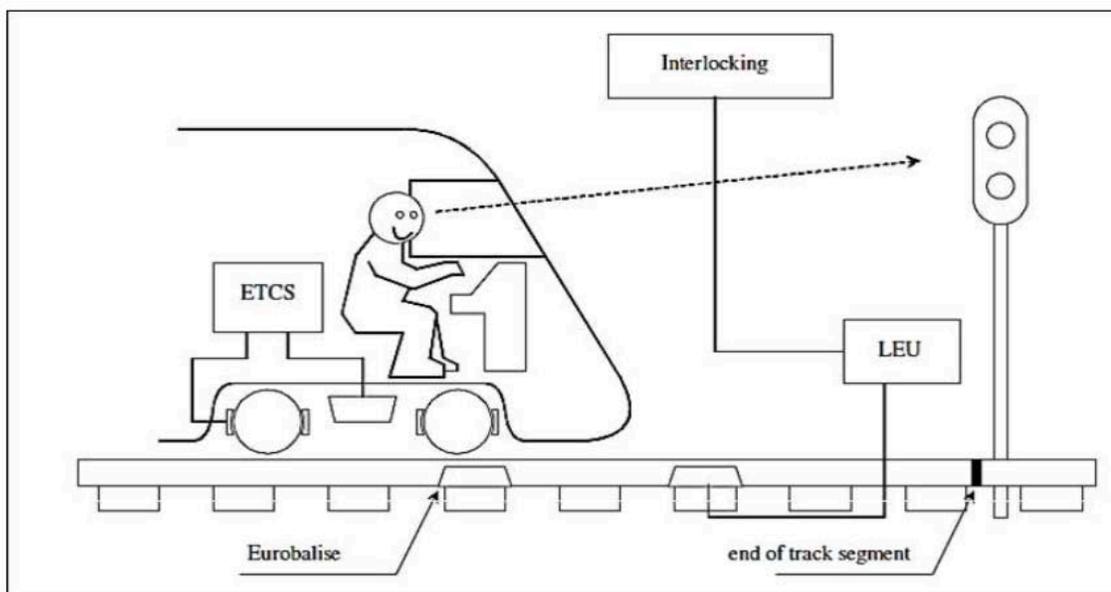


Figura 68 - Operatività ETCS Livello 1 senza infill

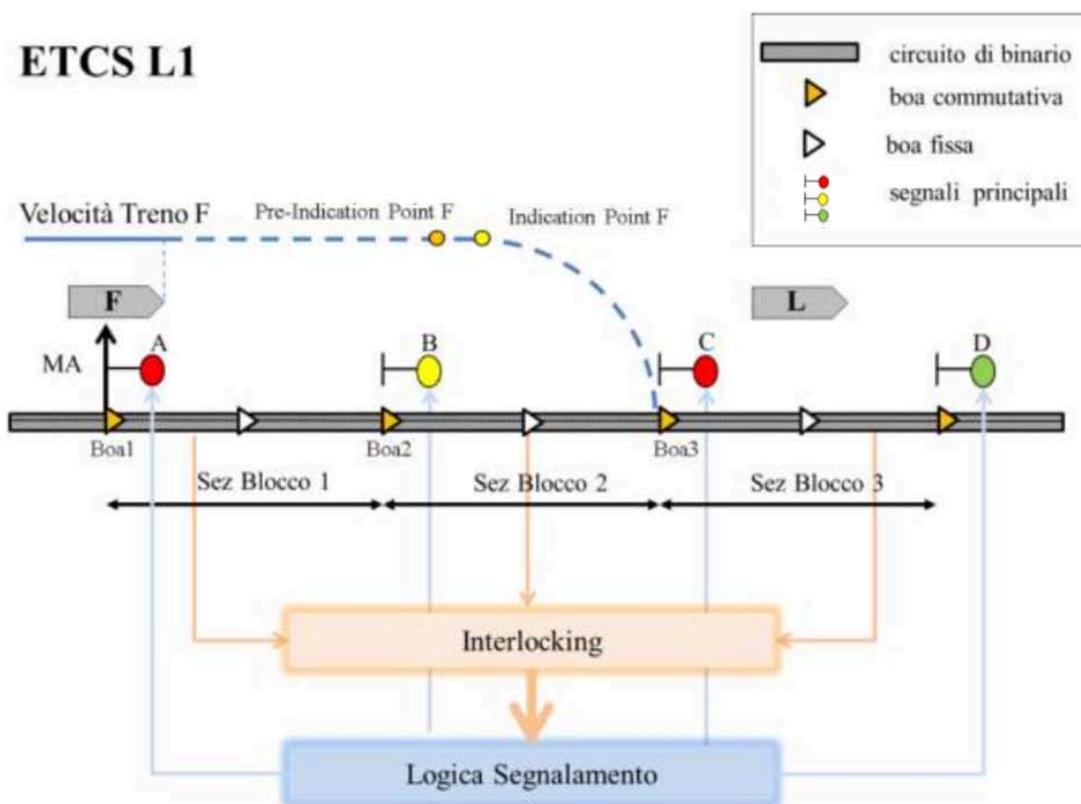
Per la variante senza *infill* la marcia del treno risulta molto irregolare: il treno è costretto a rallentare bruscamente se un segnale che si aspettava a via libera, durante il tempo di percorrenza della tratta, si è portato a via impedita oppure, al contrario, un'evoluzione in senso liberatorio del segnale successivo può essere raccolta solo quando lo si è raggiunto e pertanto ne deriva una marcia più lenta.

Sono necessarie diverse componenti tecnologiche:

- **circuiti di binario** per rilevare sia la posizione dei veicoli che la loro integrità. Il sistema di interlocking è l'apparato costituito da dispositivi che hanno la funzione di rilevare lo stato di

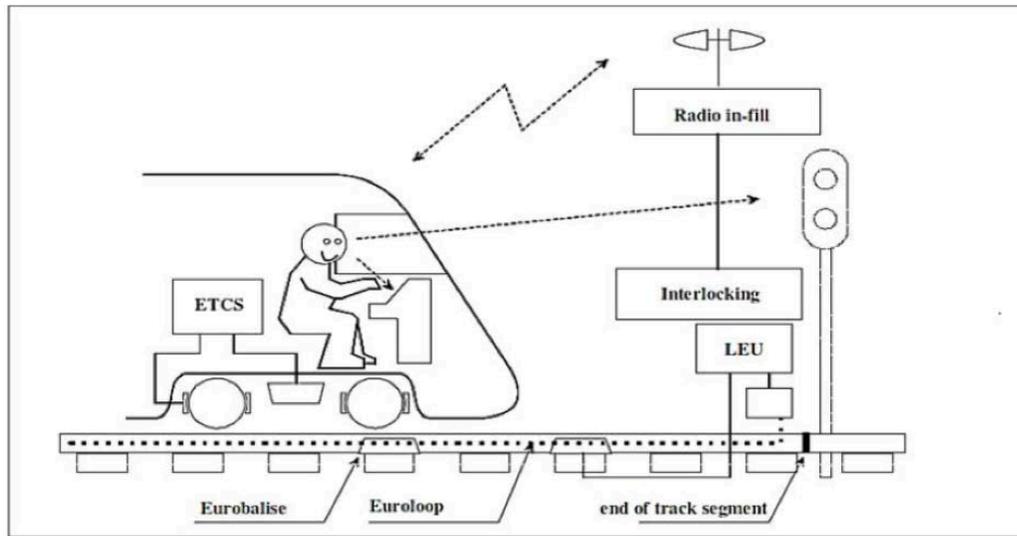
occupazione/liberazione delle sezioni di blocco e la posizione del treno.

- **Boe commutative (Eurobalise)**, sono necessarie per trasmettere direttamente in cabina l'aspetto del segnale e, quindi, la posizione coincide con quella dei segnali luminosi. Quando il veicolo transita su una boa commutativa riceve la posizione aggiornata del segnale rosso a valle (che può trovarsi ad una o più sezioni di blocco avanti) ed altri dati in un telegramma definito telegramma di *Movement Authority* (MA).
- **Segnali luminosi**, sono necessari in caso di guasto delle boe commutative; in tale circostanza si attua un regime di circolazione degradato con velocità ridotte e la marcia è regolata con l'aspetto dei segnali a vista.
- **Boe fisse**, necessarie per la correzione degli errori del sistema odometrico a bordo veicolo.



**Figura 69 - Componenti tecnologiche nell'ETCS Livello 1**

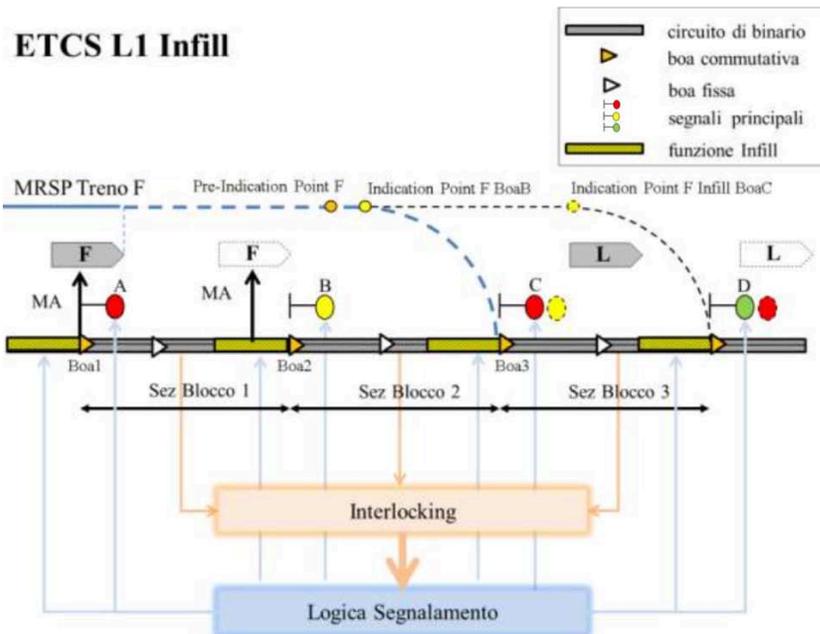
La funzione infill consiste nel trasmettere l'informazione aggiornata in modo continuo in un tratto prossimo al termine della sezione di blocco. L'inserimento di ulteriori Eurobalise, definite *Balise Infill*, o di un'antenna distribuita lungo una parte del binario (EuroLoop) permette, infatti, un infittimento delle informazioni. L'EuroLoop è il prolungamento funzionale dell'Eurobalise per una determinata distanza e consente la trasmissione dei dati al veicolo per mezzo di un cavo elettrico radiante.



**Figura 70 - Operatività ETCS Livello 1 con Infill**

La funzione Infill può essere realizzata in alternativa con un sistema di radiotrasmissione digitale Global System Mobile-Railway (GSM-R) grazie al quale il personale di terra può comunicare con il personale di bordo.

La seguente figura mostra il funzionamento:



**Figura 71 - Componenti tecnologiche nell'ETCS livello 1 Infill**

Il dispositivo infill, in sostanza, anticipa l'informazione aggiornata che il veicolo capterebbe alla boa commutativa successiva.

Il sistema ETCS di primo livello offre una maggiore sicurezza della marcia del treno rispetto al livello ETCS 0.

#### 7.4 ETCS Livello 2

Il livello 2 viene definito come una condizione operativa in cui un treno attrezzato con ERTMS/ETCS marcia su una linea controllata da un *Radio Block Centre* (RBC).

L'ETCS Livello 2 si basa su un distanziamento a blocco fisso e, quindi, la linea è ancora suddivisa in sezioni di blocco.

Tale livello prevede la trasmissione delle informazioni attraverso onde radio (GSM-R): la Movement Authority è trasmessa in modo continuo nel tempo dal RBC al SSB di ciascun veicolo. Ad esclusione dei nodi in cui sono presenti deviatori, i segnali luminosi non sono più necessari.

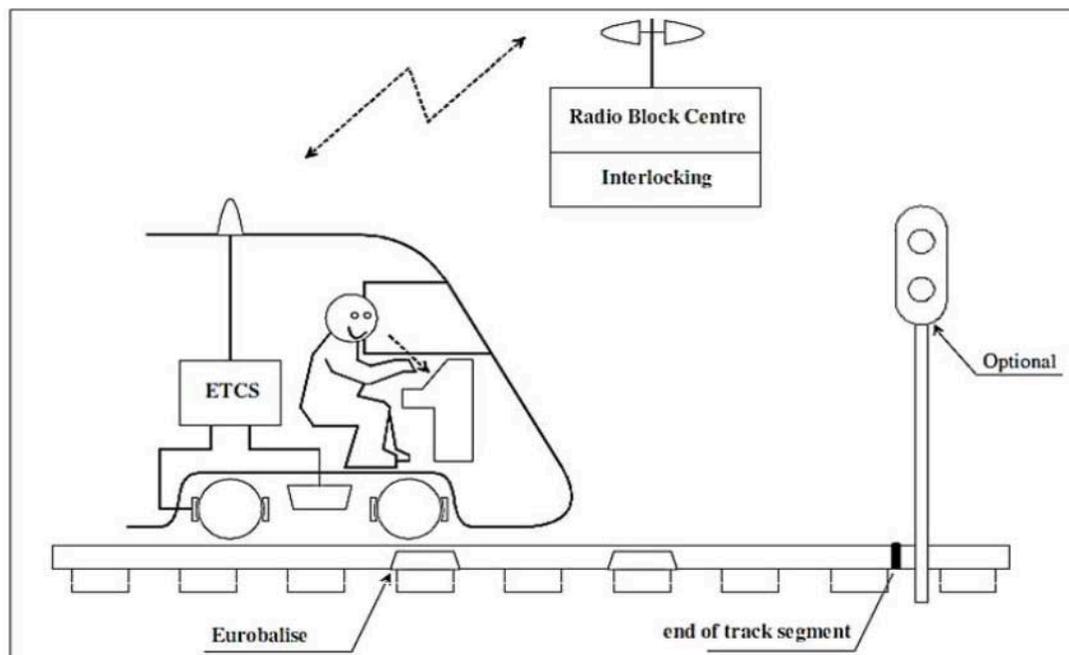
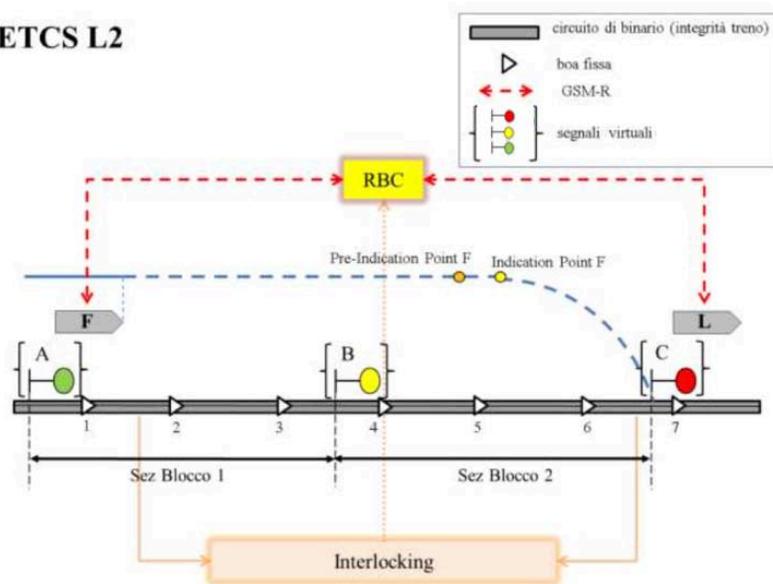


Figura 72 - Schema di massima rappresentativo del livello 2

Le componenti tecnologiche ancora necessarie sono:

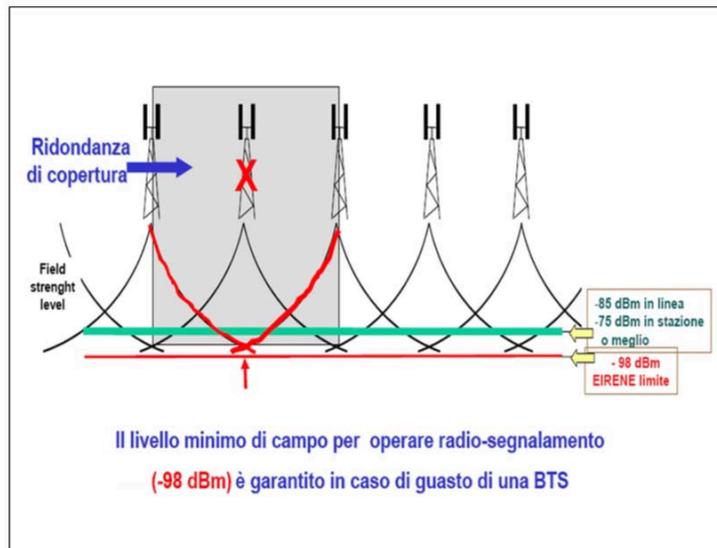
- **circuiti di binario** che verificano l'integrità del veicolo.
- **Boe fisse**, necessarie per la correzione degli errori del sistema odometrico a bordo veicolo.

## ETCS L2



**Figura 73 - Componenti tecnologiche nell'ETCS Livello 2**

Tutti i treni ad intervalli spaziali e/o temporali regolari segnalano via radio automaticamente la propria posizione e direzione di marcia al Posto Centrale di Tratta – RBC. La MA è trasmessa via GSM-R dal RBC a ciascun veicolo per mezzo di antenne BTS<sup>25</sup> di trasmissione che sono installate ad una distanza di 3 km l'una dall'altra lungo la linea e garantiscono una copertura ridondata, in quanto uno stesso tratto è coperto da entrambe le BTS contigue.



**Figura 74 - Ridondanza di copertura delle BTS**

<sup>25</sup> Base Transceiver Station

Nella figura precedente è possibile notare, in dettaglio, la ridondanza di campo offerta dalle diverse BTS in linea, dislocate come visto ogni 3 km.



**Figura 75 - Antenne BTS (Base Transceiver Station)**

Le boe passive rappresentano una sorta di “appuntamento” in linea per il treno che oltrepassandole rileva la propria posizione. In particolare, un gruppo di boe è detto “linked” (in appuntamento) quando la propria identità, posizione e orientamento sono note in anticipo.

I Punti Informativi (PI), necessari per la determinazione della posizione del treno, sono costituiti ciascuno da almeno due boe, posizionate sui binari nei punti particolarmente significativi della linea. La maggior parte di esse sono posizionate circa 200 metri prima della fine di ogni sezione, in entrambi i sensi di marcia per consentire, oltre all’individuazione della posizione, anche il senso di marcia.

Il calcolatore di bordo sorveglia costantemente i dati trasmessi e la velocità massima, permessa dalle caratteristiche del materiale rotabile e dell’infrastruttura, comandando in automatico la frenatura di emergenza se necessario.

Le autorizzazioni dinamiche, la descrizione dell’infrastruttura e la visualizzazione della traccia da percorrere, appaiono in macchina sull’interfaccia della Driver Machine Interface (DMI).



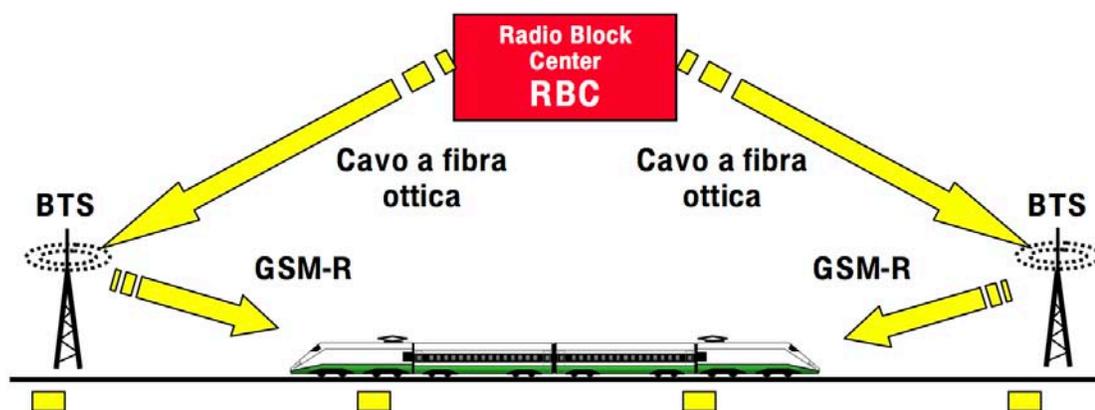
**Figura 76 - Fotografia in macchina della Driver Machine Interface**

Il sistema ERTMS di livello 2 rappresenta la tecnologia attualmente in uso per le linee ad Alta Velocità in Italia e non solo.

#### **7.4.1 CONNESSIONE RADIO**

Tra le possibili anomalie che possono riscontrarsi, durante la corsa di un treno, vi è la Perdita di Connessione Radio o comunque la Disconnessione Radio; questa avviene quando un treno non riceve più messaggi per un tempo chiamato TNV Contact assunto, in Italia, pari a 7 secondi e al di sopra del quale viene attivata la frenatura. Dopo la perdita di connessione radio, vengono effettuati dei tentativi di riconnessione (attualmente sono 3 pur essendo un valore configurabile) e se la connessione viene ripresa non viene più comandata la frenatura di servizio e la marcia continua con regolarità.

Nella figura è illustrato uno schema di massima rappresentativo del funzionamento del sistema ERTMS di secondo livello; esso sfrutta la tecnologia del Blocco Radio.



**Figura 77 - Schema rappresentativo ERTMS livello 2**

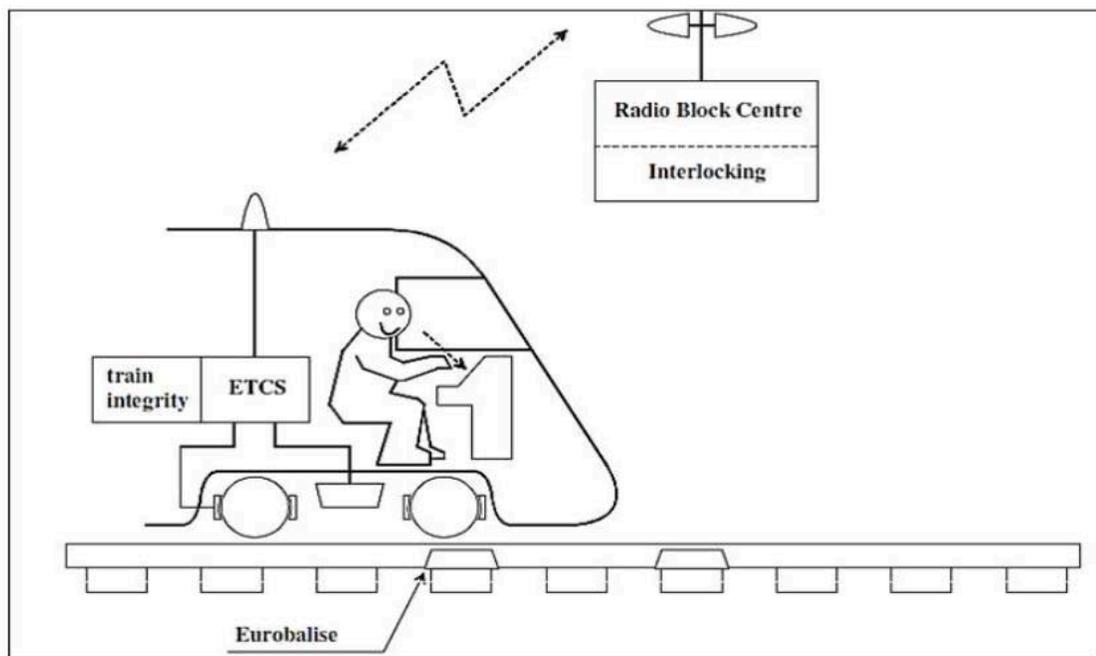
Il livello 2 è un sistema di blocco radio che rende possibile una gestione del traffico in sicurezza inviando, in modo istantaneo e automatico, al SSB l'indicazione della velocità consentita al treno e le MA. L'ERTMS di livello due non necessita di segnalamento laterale, tuttavia abbisogna di dispositivi di rilevamento sui binari.

La capacità della linea attrezzata con sistema ERTMS/ETCS di secondo livello aumenta poiché il sistema consente un controllo sicuro di velocità in modo predittivo. Dal momento che l'informazione relativa al punto di fermata o rallentamento può essere trasmessa al treno in tempo reale appena elaborata dal SST, la potenzialità della linea è più alta rispetto a quanto lo sia con segnali laterali, dato che questi sono necessariamente situati ad una certa distanza tra di loro. Per le stesse ragioni risulta anche più regolare la marcia del treno e le velocità commerciali sono maggiori.

### 7.5 ETCS Livello 3

L'ETCS livello 3 è il livello più evoluto sia dal punto di vista funzionale che tecnologico, ma è ad oggi ancora in via di sperimentazione.

Nel livello 3 non sono più necessari i dispositivi per la rilevazione del binario libero (circuiti di binario o conta assi) che sono, invece, ancora necessari nel livello 2 per la verifica della completezza del treno. Come per il livello 2, i convogli utilizzano ancora le eurobalise per valutazioni sulla localizzazione (anche se sono già in sperimentazione tratte con uso di GPS per la localizzazione dei veicoli) ed inoltrano tale informazione al RBC.



**Figura 78 - Operatività ETCS Livello 3**

A questo livello di equipaggiamento i dati della tratta sono precaricati sul computer di bordo, così che si possano confrontare con i dati odometrici. Ai fini della sicurezza, viene monitorata continuamente la posizione del treno tramite l'odometro di bordo e si verifica che la velocità sia congruente con la distanza percorsa. Il centro di controllo riceve via radio le posizioni di tutti i treni sulla linea e stabilisce istante per istante le nuove MA che trasmette, sempre via radio, al treno. Il computer di bordo non appena riceve le

nuove MA calcola istante per istante la nuova curva di frenatura e quindi il profilo di velocità ammesso. Tale informazione è visualizzata sul cruscotto del PdC. Grazie al sistema di bordo che controlla l'integrità del treno e alla comunicazione radio con il centro di controllo, a questo livello non sono necessari i CdB. Inoltre la possibilità di continui aggiornamenti della MA via radio autorizza i treni a viaggiare a distanze inferiori di quelle di frenatura e in generale fa variare la distanza reciproca in relazione alla loro velocità.

L'autorizzazione al transito sulla tratta non viene più trasmessa per sezioni di tratta a distanza predefinita, ma considerando l'effettiva posizione della coda del veicolo leader. Con il livello 3 si abbandona la classica circolazione a blocco fisso ed il distanziamento dei treni avviene secondo il principio di circolazione del blocco mobile.

Questo livello di ERTMS è ancora in fase di studio, per cui non sono previste applicazioni ferroviarie poiché restano ancora da definire alcuni aspetti relativi all'importante tema della sicurezza. Presenta tuttavia particolare interesse in quanto prevede l'eliminazione di numerose apparecchiature di terra, affidando la localizzazione e il controllo dell'integrità del treno a speciali apparati di bordo, dialoganti in continuità con il Posto Centrale (PC). Come precedentemente introdotto, tra le caratteristiche del 3° livello, ritroviamo la scomparsa del concetto di sezione di blocco fisso e la nascita della sezione di blocco dinamico, creata in funzione delle diverse esigenze di circolazione.

L'utilizzo del blocco mobile fa sì che, in un futuro ormai prossimo, due treni potrebbero viaggiare alla distanza minima di sicurezza necessaria per la frenatura, conseguenza che porterebbe un notevole aumento del traffico in linea e quindi un vantaggio sulla capacità del sistema ferroviario. Un ulteriore vantaggio, ma questa volta in termini economici, sarebbe la scomparsa della segnaletica fissa in linea e la possibile interoperabilità dei diversi sistemi ferroviari.

### **7.5.1 ERTMS/ETCS Livello 3 E INTEGRAZIONI CON Global Navigation Satellite System (GNSS)**

L'European GNSS Agency (GSA), è l'istituzione europea che gestisce e promuove il sistema di navigazione satellitare europeo (basato sui sistemi *Galileo* ed *EGNOS*<sup>26</sup>). La GSA tra l'altro promuove diversi progetti per l'implementazione del sistema ERTMS/ETCS con sistemi di navigazione satellitare che possono essere utilizzati per un riscontro preciso dei dati odometrici rilevati dall'SSB o per determinare la posizione del treno con precisione. Ad oggi i progetti che sono stati sviluppati sono:

- GRAIL: GNSS introduction in the rail sector (FP6 2nd Call);
- GRAIL-2: GNSS-Based Enhanced Odometry For Rail (FP7 2nd Call);
- GaLoROI: *Galileo* Localization for Railway Operation Innovation (FP7 3rd Call);
- SATLOC: Satellite based operation and management of local low traffic lines (FP7 3rd Call).

I progetti GRAIL sono tra loro strettamente legati e in particolare il secondo è il completamento del primo. Il progetto GRAIL è iniziato il 31 Agosto 2005 nel contesto di GADEROS<sup>27</sup> come sintesi di lavori

---

<sup>26</sup> *Galileo* è il sistema di navigazione satellitare europeo che sta per entrare in funzione e che si affiancherà all'americano GPS ed al russo Glonass. I 30 satelliti di *Galileo* sono prodotti e lanciati dall'ESA (European Space Agency). L'European Geostationary Navigation Overlay Service (EGNOS) è il primo sistema di navigazione trans-europeo ed è già operativo. Consiste di tre satelliti geostazionari ed una rete di stazioni di terra. EGNOS trasmette un segnale contenente informazioni circa l'affidabilità e l'accuratezza del segnale di posizione emesso dal sistema GPS. Permette di avere accuratezze in Europa dell'ordine di 1,5 m. EGNOS è un precursore di *Galileo*.

<sup>27</sup> *Galileo* Demonstrator for Railway Operation System

precedenti (GADEROS, INTEGRAIL, RUNE e LOCOLOC/LOCOPROL) svolti in diversi ambiti ma che, sebbene non avessero seguito lo stesso approccio, portavano a conclusioni molto simili: integrare il sistema GNSS nel campo ferroviario e in particolare nell'ETCS. Gli obiettivi quindi del primo progetto GRAIL erano:

1. specificare, sviluppare e testare un prototipo di sistema GNSS per una migliore misura odometrica compatibile con il sistema ETCS di bordo;
2. spianare la strada per una introduzione futura in più ambiti del sistema nei diversi livelli di ERTMS/ETCS;

Il progetto GRAIL ha eseguito uno studio preliminare delle applicazioni del GNSS nel settore ferroviario. Il principale raggiungimento di questo progetto GRAIL è stato quello di stabilire le specifiche tecniche per la costruzione di un sottosistema GNSS grazie al quale è possibile utilizzare il GNSS nell'odometro di precisione, per indicare la posizione assoluta e per stabilire l'integrità del treno. Per la prima volta in Europa, grazie a questo progetto, un treno ha percorso una tratta di linea commerciale (non in laboratorio) in *Full supervision mode* con il sistema ERTMS/ETCS in cui il GNSS è stato la base per la sua localizzazione.

In seguito il GRAIL-2 ha implementato, partendo dal progetto GRAIL, il sistema di odometria avanzata con GNSS per treni di alta velocità attrezzati con ERTMS/ETCS.

Gli altri due progetti, entrambi iniziati con il 2012 e non ancora conclusi, volgono la loro attenzione verso le linee a basso traffico con l'obiettivo di aumentare la loro potenzialità di circolazione e renderle maggiormente competitive dal punto di vista economico. In particolare l'obiettivo del progetto GaLoROI è di realizzare un dispositivo di bordo che certifichi la posizione dei treni che transitano sulle linee a basso traffico e la loro integrità, mentre quello del progetto SATLOC è quello di dimostrare teoricamente e praticamente che il sistema GNSS è adatto ai requisiti richiesti dai sistemi di controllo ETCS su linee locali. Il progetto SATLOC si propone inoltre di definire una metodologia per la convalida e la certificazione di sistemi di sicurezza basati sul GNSS e una strategia per il passaggio delle linee non ETCS a sistemi ETCS.

## **7.6 CAPACITA' ERTMS/ETCS A CONFRONTO**

ERTMS è stato progettato per soddisfare le diverse esigenze delle ferrovie e questo si riflette nei livelli disponibili. L'esistenza di un precedente sistema di segnalamento sulla linea, le possibilità di dotare la linea con tecnologia GSM-R, la velocità massima consentita o l'incremento di capacità, sono tra i fattori che entrano in gioco quando si sceglie un particolare livello ERTMS. Tuttavia, è comunemente riconosciuto che un ERTMS/ETCS di livello più alto porta il maggior beneficio al sistema, in quanto consente una maggiore capacità e significativi risparmi per la manutenzione attraverso la rimozione dei segnali lungo i binari.



Figura 79 - Confronto tra i diversi sistemi ERTMS

L'aumento della potenzialità della linea è stato studiato dall'International Union of Railways (UIC) nella ricerca "Influence of ETCS on line capacity" pubblicata il 21/03/2008 in cui se ne analizza l'andamento ai diversi livelli di attrezzaggio e a seconda del tipo di linea. I grafici che seguono si riferiscono a linee di alta velocità, linee principali convenzionali e linee regionali/locali.

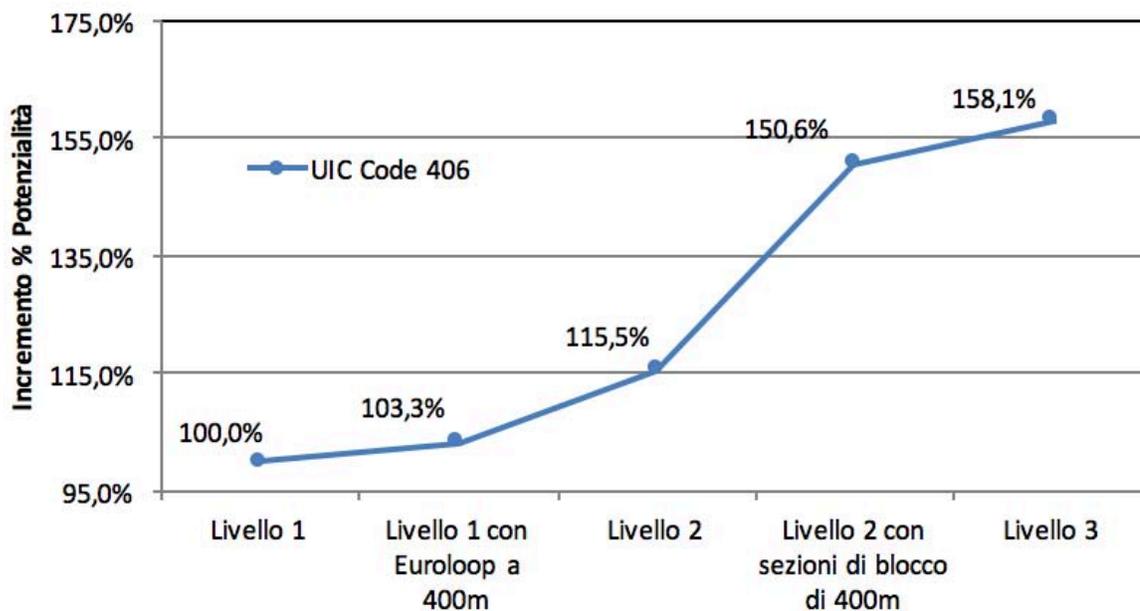
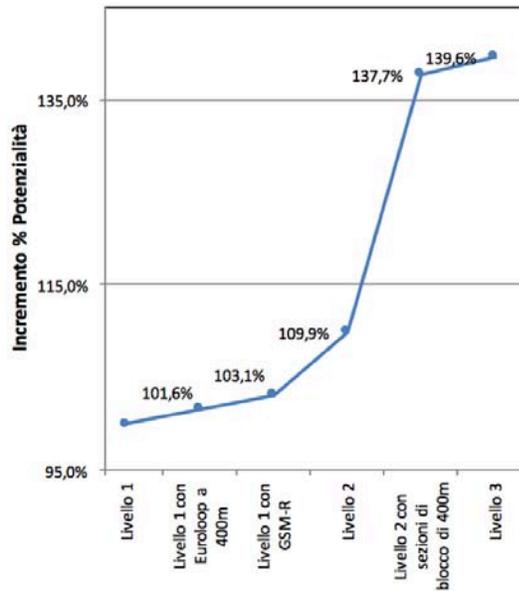
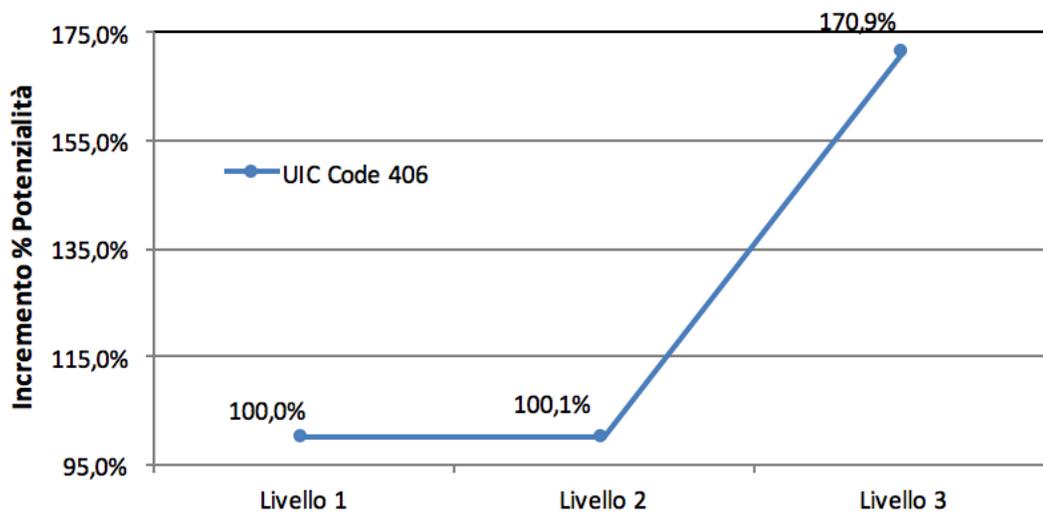


Figura 80 - Grafico d'incremento di potenzialità per linee di alta velocità (ETCS livello 1 = 100%)



**Figura 81 - Grafico d'incremento di potenzialità per linee principali convenzionali (ETCS livello 1 = 100%)**



**Figura 82 - Grafico d'incremento di potenzialità per linee locali-regionali (ETCS livello 1 = 100%)**

Dai precedenti grafici si vede come un passaggio dal livello 1 ai livelli superiori comporti un aumento di potenzialità della linea molto più marcato in linee locali che in linee di alta velocità. Ciò giustifica anche l'esistenza del progetto dell'Unione Europea ERTMS-REGIONAL.

## 7.7 ERTMS - REGIONAL

L'obiettivo che sta alla base del progetto ERTMS REGIONAL è di creare una soluzione economicamente vantaggiosa di impianti di segnalamento per linee locali e regionali, rinnovandole con l'introduzione delle specifiche interoperabili anche per queste linee. L'interoperabilità degli equipaggiamenti di bordo con quelli di terra garantita dei sistemi ERTMS consente di far transitare all'occorrenza rotabili adibiti alla TEN<sup>28</sup> sulle linee regionali e viceversa. L'esigenza di poter far transitare treni destinati alla TEN su linee convenzionali e viceversa è stata sottolineata negli anni '90 dai gestori nazionali delle linee ferroviarie nel UIC ETCS-LC (Low Cost), oggi progetto ERTMS-REGIONAL

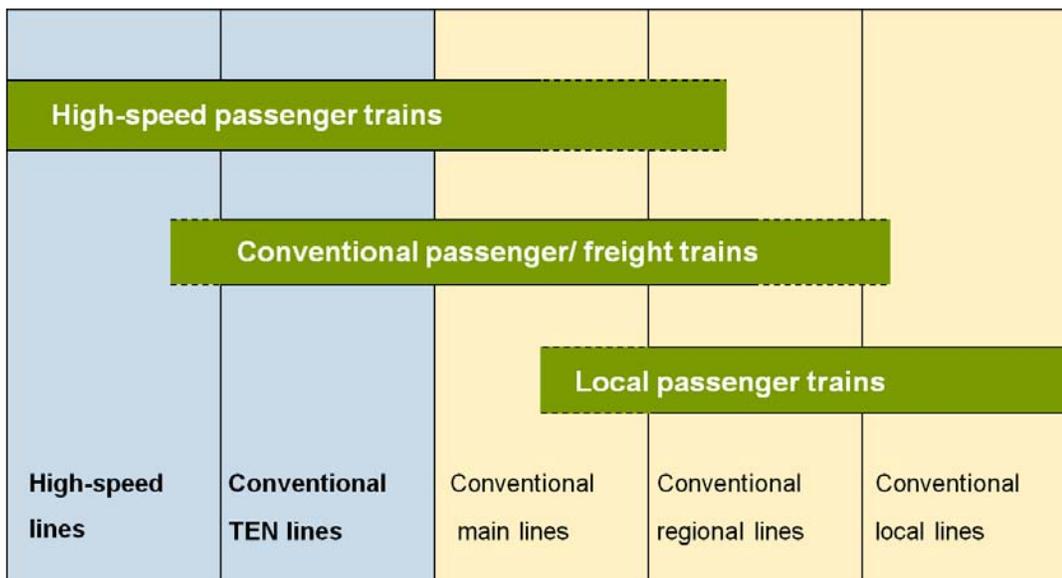


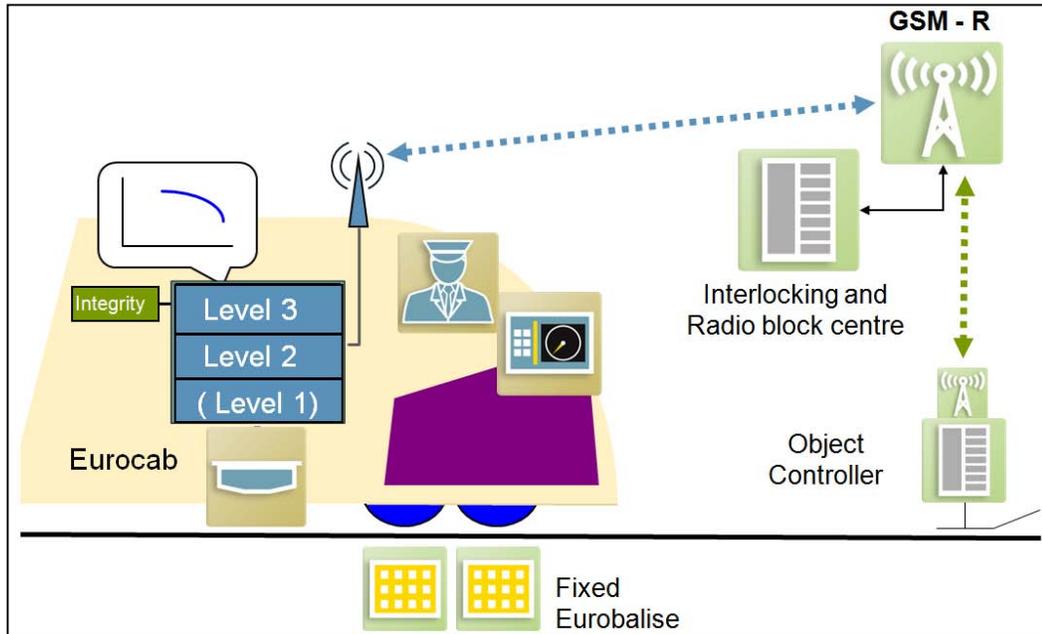
Figura 83 - Differenti categorie di linea

La scelta del progetto ERTMS REGIONAL è di usare lo stesso sistema di bordo presente in rotabili finalizzati al transito sulle linee principali. In questo modo ERTMS REGIONAL porta a ridurre del 50% gli investimenti per l'equipaggiamento laterale per le linee secondarie. Inoltre questo approccio consente una transizione progressiva delle linee secondarie verso linee principali e dunque è possibile estendere ulteriormente la portata del traffico rete regionale.

Di fatto l'innovazione dell'ERTMS REGIONAL è l'inserimento di un controllo centralizzato che comunica con i treni usando il sistema GSM-R. Da questi riceve la posizione precisa e determina le MA. Un calcolo preliminare del progetto mostra che l'ERTMS REGIONAL può ridurre i costi di esercizio delle operazioni su linee regionali del 20-35%.

L'equipaggiamento di terra del progetto ERTMS REGIONAL si basa sui concetti introdotti nell'ERTMS/ETCS livello 3, ovvero è un sistema equipaggiato con le Eurobalise di tipo fisso, con il GSM-R e non necessita di segnalazione laterale. I circuiti di binario per la localizzazione del treno e verifica di integrità non vengono eliminati da questo sistema, ma diventano opzionali.

<sup>28</sup> Trans European Network



**Figura 84 - Schema di funzionamento di base della struttura ERTMS REGIONAL**

Nella soluzione ERTMS REGIONAL l'inserimento di uno strumento che controlli l'integrità del treno è più semplice rispetto all'ETCS L3 e dunque anche i costi sono ridotti.

I vantaggi derivanti dall'utilizzo dell'ERTMS REGIONAL sono molteplici:

- riduzione del personale di stazione: i sistemi regionali e locali sono raramente dotati di sistemi di blocco automatico;
- centralizzazione del traffico: grazie al blocco radio;
- aumento delle potenzialità delle linee: la potenzialità di una linea con blocco mobile è largamente superiore a quella con sistemi di blocco fisso specialmente a basse velocità;
- aumento dei livelli di sicurezza;
- utilizzo di linee altrimenti destinate alla dismissione per i costi rilevanti.

Vista la convenienza economica che il sistema ERTMS REGIONAL consente e il miglioramento della qualità del servizio ferroviario, l'UIC ne auspica e prevede nei prossimi anni una accentuata diffusione specialmente come conseguenza dello sviluppo del sistema ETCS di livello 3.

## CONCLUSIONE

Come presentato nella tesi, i sistemi utilizzati per gestire in sicurezza la circolazione, i cosiddetti sistemi di segnalamento, influenzano la densità del flusso veicolare che è possibile realizzare su un tratto ferroviario e, quindi, la capacità di trasporto.

I sistemi di segnalamento tradizionali regolano la densità veicolare applicando il blocco fisso, mentre i sistemi moderni sono basati sul distanziamento ottenuto grazie al blocco mobile assoluto. La ricerca di settore è, infine, orientata a rendere operativi i sistemi di segnalamento basati sul blocco mobile relativo.

Il blocco mobile è, tuttavia, realizzabile solo se le informazioni necessarie al controllo della velocità sono precise, aggiornate in tempo reale e trasmesse in modo continuo nello spazio a ciascun veicolo; le tecnologie ad oggi disponibili non possiedono meccanismi così sofisticati da soddisfare pienamente questi requisiti. Per questo motivo gli attuali sistemi adottati sulla rete italiana e nel resto del mondo si basano sul sistema di blocco fisso.

Per quanto riguarda le capacità teoriche che si possono ottenere con i sistemi di blocco, nella tesi si è sottolineato come l'utilizzo del blocco mobile può massimizzare la capacità della linea, sfruttando il distanziamento minimo possibile, calcolato istante per istante; in particolare la differenza della capacità tra i due blocchi è più rilevante 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.

Tra i sistemi di gestione in sicurezza della marcia dei treni sono stati presentati il Sistema di Supporto alla Condotta (SSC) e il Sottosistema di Controllo Marcia Treni (SCMT); prevedono entrambi che vi sia un SottoSistema di Terra (SST) che dialoga con il SottoSistema di Bordo (SSB) per scambiare informazioni relative alla marcia sicura del treno. Nel caso, infatti, non siano rispettate le condizioni che garantiscono una corretta circolazione del traffico il SottoSistema di Bordo attiverà automaticamente e in modo autonomo la frenatura di emergenza, per la quale RFI ha sviluppato un proprio modello di studio.

Pur essendo questi sistemi molto efficaci all'interno dei singoli paesi, non rispondono a criteri di interoperabilità europei; per questo motivo a partire dal 1991 il Consiglio Europeo ha emanato direttive riguardanti lo "Sviluppo delle ferrovie comunitarie". Nel 2006 si è giunti alla nascita del sistema ERTMS/ETCS compatibile su tutte le linee di alta velocità europee facenti parte dei sei corridoi europei principali individuati dalla Commissione Europea.

Il sistema ERTMS/ETCS, che è un sistema di gestione, controllo e protezione del traffico ferroviario e relativo segnalamento a bordo, opera a 4 diversi livelli di equipaggiamento della linea e del treno, ognuno dei quali, dal livello 0 al livello 3, aumenta maggiormente la potenzialità e la sicurezza. L'ERTMS di livello 2 rappresenta la tecnologia attualmente in uso per le linee ad Alta Velocità in Italia e non solo.

L'ERTMS/ETCS di livello 3, che presuppone l'utilizzo di un sistema di blocco mobile, è, invece, il futuro per quanto riguarda il trasporto ferroviario; la sua adozione, infatti, porterebbe ad un notevole incremento della capacità delle linee. L'attuale sistema GPS, necessario per il corretto funzionamento del blocco mobile, tuttavia, non garantisce ancora il rilevamento puntuale della posizione del rotabile richiesta da così alte velocità di esercizio.

Lo sviluppo, dunque, di nuove tecnologie, nel campo della navigazione satellitare e in particolare nel segnalamento dei treni, può portare benefici notevoli in ambito ferroviario.

I sistemi di nuova concezione, come EGNOS, rappresentano il primo tentativo di spostarsi verso il sistema di blocco mobile; EGNOS è in grado di fornire, in maniera accurata, la posizione del treno e, in caso di rilevazione di un errore, di aumentare cautelativamente il distanziamento tra un treno e l'altro.

Tuttavia, neppure questi sistemi forniscono delle certezze tali da poter avviare l'adozione del sistema a blocco mobile e di conseguenza dell'ERTMS/ETCS di livello 3; i progetti finanziati non solo dall'Europa, ma anche da altri paesi extra-europei sono proprio indirizzati verso l'ulteriore sviluppo di questi sistemi di navigazione satellitare.

Per quanto riguarda, invece, il progetto ERTMS REGIONAL, che rende possibile la riattivazione e la bonifica di linee regionali e locali altrimenti sotto sfruttate o non utilizzate, oltre a portare vantaggi per i gestori delle linee che rendono il loro servizio più efficiente, consente anche alle aziende più decentrate di utilizzare in maniera conveniente il trasporto su rotaia, riducendo la necessità di ricorrere al trasporto merci su gomma. Inoltre l'aggiornamento delle reti ha ripercussioni sociali positive: esso garantisce una maggiore capillarità del servizio ferroviario per il trasporto passeggeri, velocizzando gli spostamenti e aumentando la mobilità della popolazione. Questo sviluppo tecnologico garantisce alla rete ferroviaria una maggiore penetrazione del mercato dei trasporti sostituendo quella fetta di mercato attualmente occupata dal trasporto su gomma, contribuendo in modo significativo alle riduzioni delle emissioni globali di gas a effetto serra.

Per quanto riguarda la rete interna italiana, non si possono immaginare, dunque, sviluppi diversi da quelli che volgono verso la formazione della rete ferroviaria trans-europea o verso l'adeguamento delle proprie linee a tali standard.

## APPEDICE A

### SOFTWARE OpenTrack

Il software di simulazione *OpenTrack*<sup>®</sup> è stato sviluppato da A. Nash e D. Huerlimann presso l'ETH di Zurigo (Nash & Huerlimann, 2004) per uso commerciale. Esso è un simulatore del tipo “multi-train” cioè che consente di simulare contemporaneamente più veicoli sull'infrastruttura.

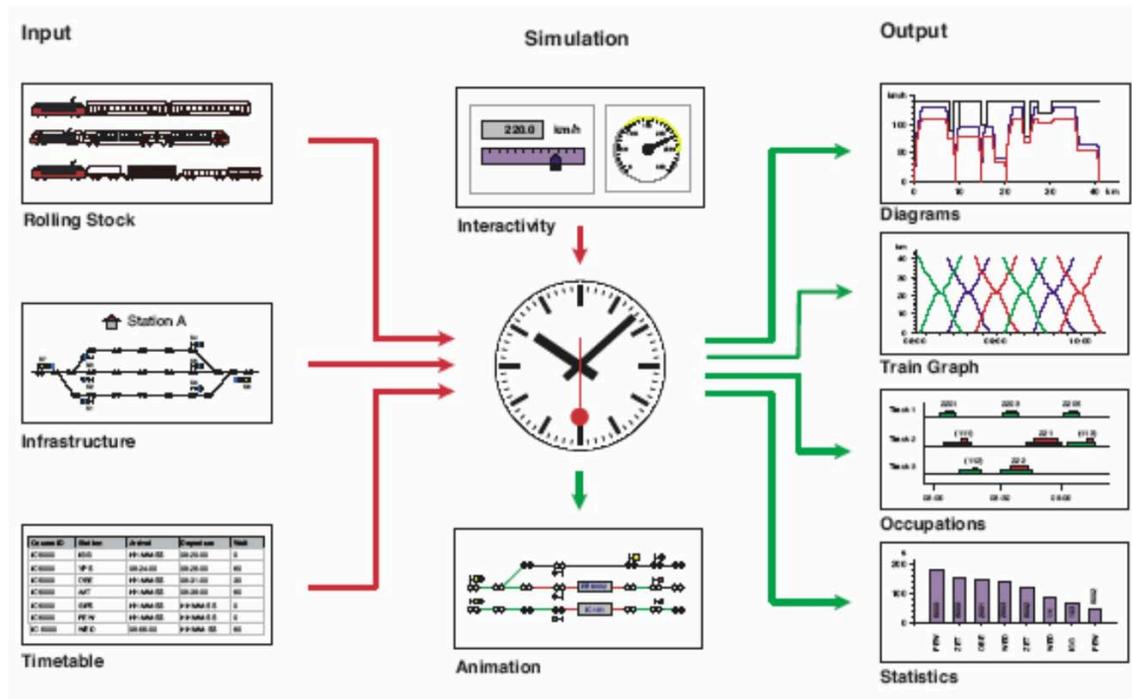
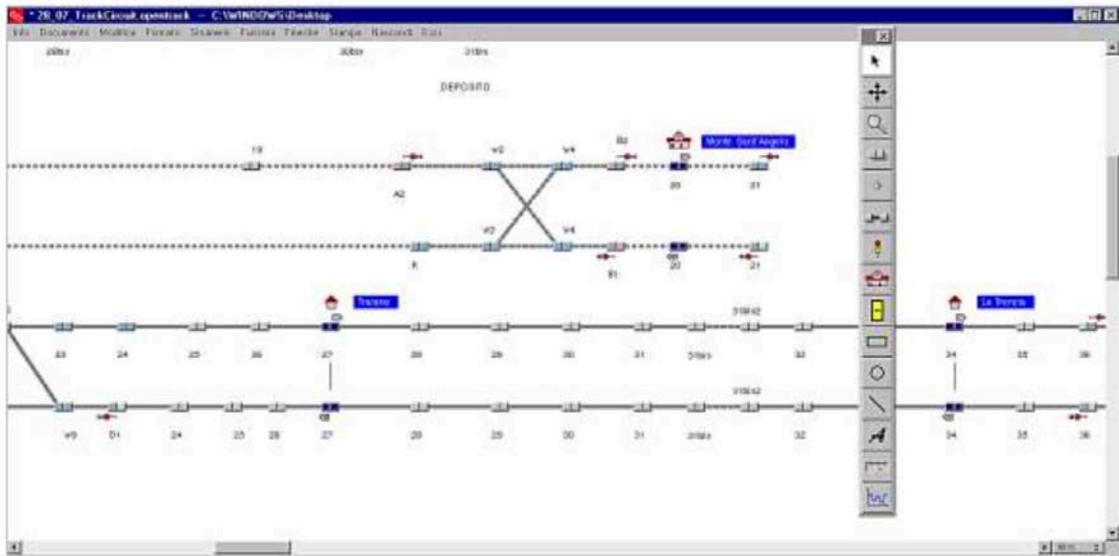


Figura 85 - Architettura del software OpenTrack (Nash, Huerlimann, 2004)

L'architettura del codice è basata su tre moduli distinti in base al tipo di dati in ingresso richiesti:

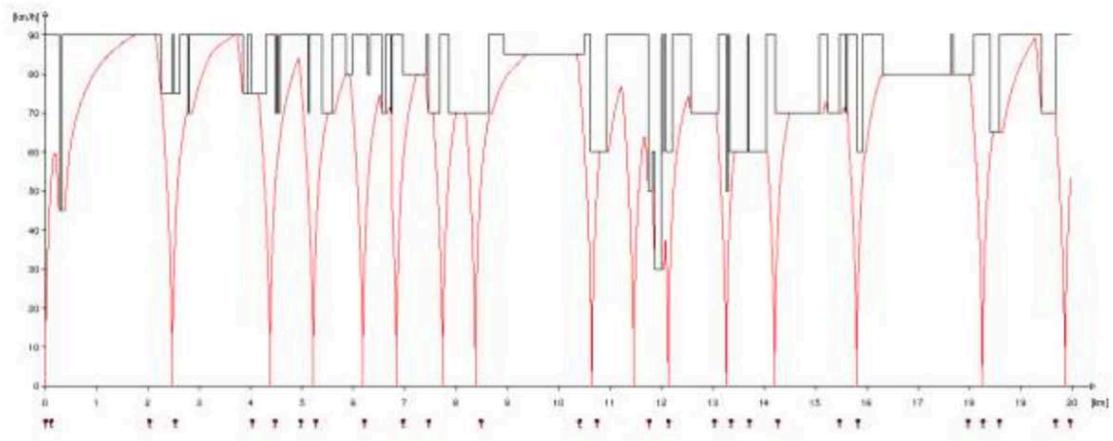
- Il modulo *Rolling Stock* gestisce tutti i dati relativi alle caratteristiche fisiche e prestazionali dei convogli. Uno specifico materiale rotabile è caratterizzato da una categoria di appartenenza (ad esempio Intercity, Regionale, Metropolitano, ecc), da caratteristiche fisiche (massa, lunghezza, numero di vagoni, ecc), da caratteristiche prestazionali (curva caratteristica meccanica, tipo di alimentazione del motore, ecc.). Attraverso le curve sforzo di trazione-velocità il modulo consente di calcolare anche il consumo di energia di trazione.
- Il modulo *Infrastrucutre* gestisce la costruzione e visualizzazione del grafo della rete. Tutte le caratteristiche geometriche del tracciato sono descritte come attributi di arco, mentre i nodi rappresentano stazioni, segnali luminosi, boe, deviatori ed altre componenti ancora. In questo modulo viene gestita anche la creazione e visualizzazione delle sezioni di blocco, dei percorsi e degli itinerari; per i nodi stazione è possibile anche specificare il tipo di apparato di stazione (interlocking)
- Il modulo *Timetable*, infine, riproduce l'orario di esercizio in termini di orario di partenza/arrivo per ciascuna stazione, tempi di servizio passeggeri, gestione coincidenze, ecc. Tale modulo

fornisce come output la percentuale dei treni che hanno maturato un ritardo pari o superiore ad un valore prefissato.



**Figura 86 - Esempio del modello di rete nel software OpenTrack**

I dati di output del software sono sia in formato numerico che grafico e consistono in: diagrammi del moto (velocità ed accelerazione funzione dello spazio e del tempo), tempi di occupazione delle sezioni di blocco, statistiche sui ritardi (percentuale di treni ritardati in una certa stazione), diagrammi di consumo di energia di trazione (diagrammi tempo-potenza, spazio-energia elettrica/meccanica).



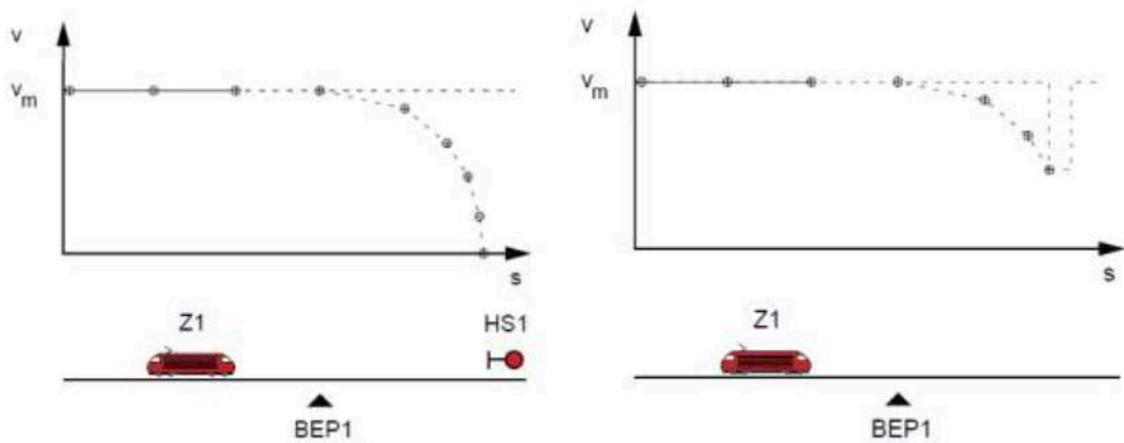
**Figura 87 - Esempio di diagramma spazio-velocità fornito da OpenTrack**

Il software consente di simulare sia il segnalamento con blocco fisso che con blocco mobile assoluto.

In caso di blocco fisso, per la modellizzazione del comportamento in frenata, OpenTrack utilizza un modello analitico semplificato.

Tale modello di decelerazione viene utilizzato per definire il punto di inizio frenatura (indicato nella seguente figura come BEP1): il calcolo viene eseguito a ritroso (*backward*) cioè a partire dal punto target (segnale rosso o punto con velocità inferiore) e dalla velocità target applicando la decelerazione del modello prima descritto e fino al raggiungimento della velocità corrente del veicolo. La curva di frenatura è una spezzata calcolata con un modello analitico considerando la decelerazione costante a tratti.

Ottenuto il punto di inizio frenatura, il veicolo avanza a velocità costante fino a tale punto per poi seguire il profilo di decelerazione precalcolato. Nella seguente figura viene mostrato il profilo di decelerazione precalcolato per l'approccio al segnale rosso HS1 (a sinistra) e per la restrizione di velocità (a destra):



**Figura 88 - Applicazione frenatura con blocco fisso**

I punti contrassegnati sui profili rappresentano i valori ottenuti per ogni step di calcolo. Quando il veicolo ha raggiunto la velocità obiettivo o se il rallentamento non è più necessario la manovra di arresto in corso viene annullata ed il veicolo acquisisce la velocità obiettivo ed il punto obiettivo aggiornati in funzione dello stato del sistema di segnalamento.

In caso, invece, di distanziamento con blocco mobile, il software consente la simulazione che risulta tuttavia molto complicata:

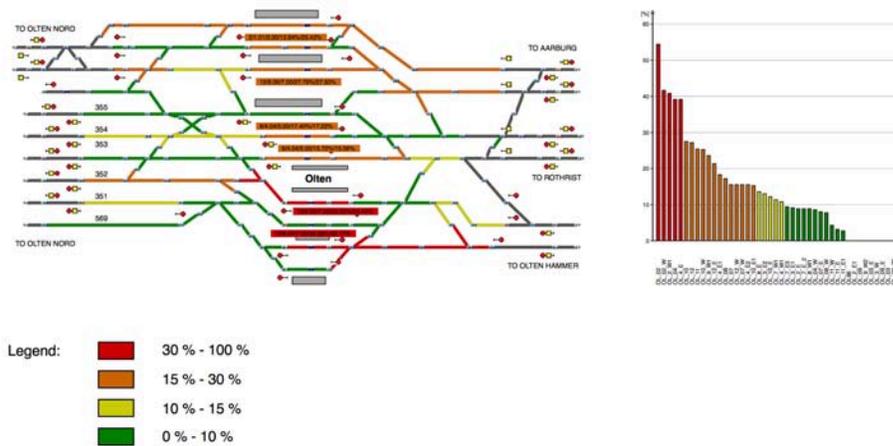
### **SOFTWARE RailSys**

Il software *RailSys*<sup>®</sup> è un software commerciale ideato presso la Leibniz Universität of Hannover e, successivamente, sviluppato in collaborazione con la Rail Management Consultants (Siefer & Radtke, 2005). Il software trova applicazione nella progettazione e verifica dell'orario di esercizio ferroviario.

Anche tale software ha una struttura modulare :

- L' *Infrastructure manager* è il modulo attraverso il quale sono inseriti e gestiti tutti i dati inerenti l'infrastruttura. I dati di input gestiti da tale modulo sono quelli tipici dei modelli microscopici (pendenze, raggi di curvatura, velocità massime, tipo di segnalamento, lunghezza sezioni di blocco, ecc).
- Il modulo *Timetable manager* gestisce tutti i dati relativi all'orario di esercizio (tempi di sosta, orario di arrivo/partenza stazioni, ecc.).

- Il modulo *Simulation Manager* gestisce tutti i dati di input relativi al materiale rotabile (massa, lunghezza, numero di veicoli, curva sforzo frenante-velocità, ecc.). Attraverso questo modulo è possibile, inoltre, svolgere una progettazione robusta del timetable.
- Il modulo *Evaluation Manager*, infine, ha la funzione di elaborare i dati di output delle simulazioni; grazie ad esso si ottengono diagrammi del moto tempo-velocità, tempi di occupazione delle sezioni di blocco, traiettorie dei veicoli, ritardi alle stazioni, numero di treni ritardati, ecc.



**Figura 89 - Statistiche sull'occupazione dell'infrastruttura (nell'esempio la percentuale di occupazione in ora di punta)**

## APPENDICE B

### SCRIPT MATLAB PER IL CALCOLO DELLO SPAZIO DI FRENATURA A SEGUITO DI ATTIVAZIONE DELLA FRENATURA DI EMERGENZA DA PARTE DEL SSB

Ho proceduto alla scrittura del programma Matlab che permette di calcolare lo spazio di frenatura dovuto all'attivazione della frenatura di emergenza da parte del SSB, già presentata capitolo 4.

Questo script funziona in egual modo per qualsiasi velocità di partenza ed arrivo, pendenza della linea, tempo di ritardo dell'SSB e percentuale di massa frenante; risulta quindi possibile calcolare lo spazio di frenatura in qualsiasi condizione di esercizio.

```
% Script per calcolare lo spazio di frenatura S nel caso di
% azionamento della frenatura di emergenza da parte del
% SSB
%
% I primi cinque valori di input sono le variabili di ingresso
% del mio modello
%
% h è il tempo di ritardo del SSB espresso in secondi
h=input('inserire il valore di h');
%
% i è la pendenza della linea
i=input('inserire il valore di i');
%
% lambda è la percentuale di massa frenante
lambda=input('inserire il valore di lambda');
%
% V0 è velocità obbiettivo espressa in m/s
V0=input('inserire il valore di V0');
%
% V è la velocità iniziale espressa in m/s
V=input('inserire il valore di V');
%
disp('inserire il valore EP=1 se FrenoElettroPneumatico è
efficiente')
disp('inserire il valore EP=0 se FrenoElettroPneumatico non
è efficiente')
EP=input('inserire valore EP');
%
% av , bv , cv , aM , bM , cM sono dei parametri che devo
% conoscere per calcolare lo spazio di frenatura
av=input('inserire il valore di av');
bv=input('inserire il valore di bv');
cv=input('inserire il valore di cv');
aM=input('inserire il valore di aM');
bM=input('inserire il valore di bM');
cM=input('inserire il valore di cM');
%
% LV è un valore di default legato al tipo di freno del treno
% viaggiatori
LV=input('inserire il valore di LV');
%
% LM è un valore di default legato al tipo di freno del treno
% merci
LM=input('inserire il valore di LM');
%
% Per calcola tff devo fare una distinzione tra il tipo di freno
% che utilizzato che cambia in base al tipo di treno
disp('per distinguere i casi in cui il treno considerato è un
treno viaggiatori')
disp('o un treno merci imponiamo m=0 per il primo caso,
m=1 per il secondo')
m=input('inserire valore di m');
%
% tff è il tempo di ritardo da associare alla propagazione
% della depressione in condotta generale.
If m==0
L=LV;
tfv=av+(bv*(L*(1-EP)/100))+(cv*(L*(1-EP)/100)^2);
tff=tfv;
else if m==1
L=LM;
tfm=av+(bv*(L*(1-EP)/100))+(cv*(L*(1-EP)/100)^2);
tffm=aM+(bM*(L/100))+(cM*(L/100)^2);
tff=max(tfv,tffm);
```

```

end
end
% Dt è il coefficiente di sicurezza
Dt=input('inserire il valore di Dt');
%
% tf è il tempo durante il quale il modello assume che
% nessuna forza sia applicata ai freni
tf=Dt*tf;
%
% Ki1 , Ki2 , Ki3 sono dei coefficienti necessari per calcolare
% lo spazio di frenatura
Ki1=input('inserire il valore di Ki1');
Ki2=input('inserire il valore di Ki2');
Ki3=input('inserire il valore di Ki3');
%
% i1 e i2 sono utilizzate per contemplare il contributo delle
% inerzie dovute alle masse rotanti
i1=input('inserire il valore di i1');
i2=input('inserire il valore di i2');
%
% di è il valore della decelerazione dovuta alla pendenza
% della linea
if i>i1
di=9.81*Ki1*i;
else if i>i2 && i<=i1
di=9.81*Ki2*i;
else if i<=i2
di=9.81*Ki3*i;
end
end
end
% cr è un parametro che devo conoscere per calcolare lo
% spazio di frenatura
cr=input('inserire il valore di cr');
% K0 è un coefficiente di protezione rispetto alle velocità
% obbiettivo non nulle
K0=1-(cr*(V0/V));
% nC e VC sono dei parametri necessari per calcolare lo
% spazio di frenatura
nC=input('inserire il valore di nC');
VC=input('inserire il valore di VC');
% KC è un coefficiente di correzione per velocità elevate

```

```

if V<=VC
KC=1;
else V>VC
KC=1+(nC*(V-VC));
end
% Kr è un coefficiente di protezione che tiene conto della
% dispersione delle prestazioni frenanti intorno al valore
% medio ed è legato alle
% prestazioni garantite dal materiale rotabile
Kr=input('inserire il valore di Kr');
%
% A , B , C , x , y sono dei parametri necessari per il calcolo
% dello spazio di frenatura
A=input('inserire il valore di A');
B=input('inserire il valore di B');
C=input('inserire il valore di C');
x=input('inserire il valore di x');
y=input('inserire il valore di y');
% VL è una velocità necessaria per il calcolo di dr
VL=x*(lambda)^y;
% dr è il valore di decelerazione nominale legato alla
% percentuale di peso frenante del treno
if V<=VL
dr=(A*lambda)+B;
else V>VL
dr=((A*lambda)+B)*(1.55-(C*(V-VL)));
end
% dp è il valore di decelerazione costante, dovuto alla
% frenatura, utilizzato nel modello nella fase di frenatura a
% regime
dp=K0*KC*Kr*dr;
z=V-(di*(tf+h));
if z>V0
Vbeta=z;
else
Vbeta=V0;
end
% S è lo spazio di frenatura nel caso di frenatura di
% emergenza attivata dal SSB
S=(h+tf)*Vbeta+(((Vbeta)^2-(V0)^2)/(2*(dp+di)));
disp('Il valore dello spazio di frenatura espresso in metri è')
disp(S)

```

Si è supposto di esaminare il caso in cui un treno viaggiatori stia viaggiando ad una velocità di 330km/h e venga attivata la frenatura di emergenza, per arrestare il treno; nella tabella seguente sono riportati i dati che hanno permesso di valutare lo spazio di arresto.

**Tabella 22 - Dati di input necessari al calcolo dello spazio di frenatura**

Parametro	Valore
h = tempo di ritardo del SSB	1 s
i = pendenza della linea	0.001
$\lambda$ = percentuale di peso frenante	95%
V0 = velocità finale	0 km/h = 0 m/s
V = velocità iniziale	330 km/h = 91.67 m/s
EP = FrenoElettroPneumatico	1
av	3.5
bv	0
cv	0.15
aM	13.5
bM	0
cM	0.04
LV	650
LM = lunghezza treno merci	0 m

Dt = coefficiente di sicurezza	1,2
Ki1	0.9
Ki2	1
Ki3	1.1
i1	0
i2	-0.021
cr	0.05
nC	0.0008
VC	47.22
Kr = coefficiente di protezione	1.5
A	0.00685
B	0.094
C	0.00756
x	4.492
y	0.443

Lo spazio di arresto risulta pari nel caso considerato a:

$$S = 3742 \text{ m}$$

Questo dato risulta verosimile poiché nel sito francese TVG si afferma che un treno, con le medesime caratteristiche, lanciato in piano a 300km/h si ferma in circa 3300 m in frenata di emergenza, portando i freni a circa 800°C. In frenata normale i freni raggiungono i 500°C e la distanza necessaria per l'arresto è dell'ordine dei 10000 m.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Senesi F., Marzilli M., *ETCS European Train Control System. Sviluppo e messa in esercizio in Italia*, CIFI, 2008;
- [2] Guida P., Milizia E., *Dizionario Ferroviario*, CIFI, 2006;
- [3] Mayer L., *Impianti Ferroviari, Volume 1 e 2*, CIFI, 2004;
- [4] Vicuna G., *Organizzazione e tecnica ferroviaria*, CIFI, 1989;
- [5] Rete Ferroviaria Italiana (RFI), *“Piano Nazionale per lo sviluppo e l’implementazione dell’ERTMS per l’infrastruttura ferroviaria”*, RFI, 2008;
- [6] Bargiacchi A., Migliorini C., *Riordino normativo: sull’Autorizzazione al Movimento*, La Tecnica Professionale, Marzo 2014;
- [7] Bianchi M., Rizzo V., *“Tecnica della circolazione ferroviaria”*, CIFI, 1979;
- [8] Caronti D., Ciaffi M., Senesi F., *ERTMS via satellite*, La Tecnica Professionale, Gennaio 2014;
- [9] Gian Gherardo Calini, *“European GNSS Applications in H2020”*, GSA, 27 Novembre 2013;
- [10] Caronti D., Marcoccio S., Olmi A., Senesi F., *ERTMS/ETCS Livello 2 su rete convenzionale*, La Tecnica Professionale, Maggio 2014;
- [11] Genovesi P., Ronzino C. D., *Flussi e capacità delle linee ferroviarie a doppio binario*, Ingegneria Ferroviaria, Luglio-Agosto 2006;
- [12] Lupi M., *Elementi di circolazione ferroviaria*, Dispense del corso dell’Università degli Studi di Bologna, 2006;
- [13] Ricci S., *trasporti ferroviari*, dispense del corso dell’università di Roma “sapienza”, 2012;
- [14] Ronzino C. D., *Un’ipotesi di classificazione funzionale delle linee ferroviarie convenzionali a doppio binario*, La Tecnica Professionale, Settembre 2008;
- [15] Senesi F., Malangone M., Piccolo A., Galdi G., *“Utilizzo dei linguaggi formali per l’analisi e la valutazione delle specifiche test del sistema ERTMS della rete italiana ad Alta Velocità”*, Ingegneria Ferroviaria, Dicembre 2006;
- [16] De Palatis P., *“Regolamenti e sicurezza della circolazione ferroviaria”*, Ingegneria Ferroviaria, 01/1992;
- [17] Commissione europea-direttorato generale per la mobilità e i trasporti, *“The Core Network Corridors”*, TENtech, settembre 2013;
- [18] Stefano Ricci, *“Dispense del corso di Trasporti Ferroviari”*, Università degli studi Sapienza di Roma, maggio 2013;

- [19] Frigo F., “*Ferrovie, cos’ l’Europa è più vicina*”, L’Unità, 03 marzo 2014;
- [20] Policicchio F., *Lineamenti di infrastrutture ferroviarie*, Firenze University Press, 2008
- [21] UIC, *International Railway Statistics*, UIC, 2006;
- [22] UIC Leaflet 405-1, *Method to be Used for the Determination of the Capacity of Lines*, International Union of Railways, 1983;
- [23] UIC Leaflet 405 OR, *Links between Railway Infrastructure Capacity and the Quality of Operations*, International Union of Railways, 1996;
- [24] UIC, *Influence of ETCS on the line capacity*, International Union of Railways, 2008;
- [25] UIC, *Influence of the European Train Control System (ETCS) on the capacity of nodes*, International Union of Railways, 2010;
- [26] *Trattato di Maastricht*, Gazzetta Ufficiale n. C 191 del 29.7.1992;
- [27] *Direttiva 96/48/CE del Consiglio* del 23 luglio 1996;
- [28] *Direttiva 2001/16/CE del Parlamento europeo e del Consiglio* del 19 marzo 2001;
- [29] *Direttiva 2008/57/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio dell’Unione Europea* del 25 luglio 2008;
- [30] *Decisione n. 884/2004/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio* del 29 aprile 2004;
- [31] *Decisione n. 1692/96/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio* del 23 luglio 1996;
- [32] *Memorandum MEMO/10/526 della Commissione europea* del 27 ottobre 2010;
- [33] *Comunicazione della Commissione Europea COM(2005) 298* del 04 luglio 2007;
- [34] *Comunicazione della Commissione COM(1999) 54 def.* del 10 febbraio 1999;
- [35] *Decisione n. 661/2010/UE del Parlamento europeo e del Consiglio* del 7 luglio 2010;

## SITOGRAFIA

- [1] Dispense master ingegneria dei trasporti Università degli studi Sapienza di Roma –  
“[http://dicea.uniroma1.it/master\\_iisf/upload/files/](http://dicea.uniroma1.it/master_iisf/upload/files/)”
- [2] SSC - ECM spa - “<http://www.ecmre.com/it/ssc.xhtml>”
- [3] Le tecnologie innovative dell’AV/AC, Le caratteristiche tecniche - RFI -  
“<http://www.rfi.it/cms/v/index.jsp?vgnextoid=587601f79697b110VgnVCM1000003f16f90aRCRD>”
- [4] Sicurezza e tecnologia - RFI -  
“<http://www.rfi.it/cms/v/index.jsp?vgnextoid=54808c3e13e0a110VgnVCM10000080a3e90aRCRD>”
- [5] Galileo is the European global satellite-based navigation system; European GNSS Agency -  
“<http://www.gsa.europa.eu/galileo-0>”
- [6] Lepida TV, l’infrastruttura si presenta - “[http://www.lepida.tv/video/Linfrastruttura-si-presenta\\_167.html](http://www.lepida.tv/video/Linfrastruttura-si-presenta_167.html)”
- [7] European Rail Traffic Management System - Wikipedia, the free encyclopedia -  
“<http://en.wikipedia.org/wiki/ERTMS>”
- [8] GADEROS - Wikipedia, the free encyclopedia - “<http://en.wikipedia.org/wiki/GADEROS>”
- [9] Moving block - Wikipedia, the free encyclopedia - “[http://en.wikipedia.org/wiki/Moving\\_block](http://en.wikipedia.org/wiki/Moving_block)”
- [10] European Train Control System - Wikipedia, the free encyclopedia -  
“[http://en.wikipedia.org/wiki/European\\_Train\\_Control\\_System](http://en.wikipedia.org/wiki/European_Train_Control_System)”
- [11] Rete ferroviaria trans-europea - Wikipedia - “[http://it.wikipedia.org/wiki/Rete\\_ferroviaria\\_trans-europea](http://it.wikipedia.org/wiki/Rete_ferroviaria_trans-europea)”
- [12] Sistema di controllo della marcia del treno - Wikipedia - “<http://it.wikipedia.org/wiki/SCMT>”
- [13] Circuito di binario - Wikipedia - “[http://it.wikipedia.org/wiki/Circuito\\_di\\_binario](http://it.wikipedia.org/wiki/Circuito_di_binario)”
- [14] ERTMS - Wikipedia - “<http://it.wikipedia.org/wiki/ERTMS>”
- [15] Segnalamento ferroviario - Wikipedia - “[http://it.wikipedia.org/wiki/Segnalamento\\_ferroviano](http://it.wikipedia.org/wiki/Segnalamento_ferroviano)”
- [16] Balise - Wikipedia - “<http://it.wikipedia.org/wiki/Balise>”
- [17] Blocco ferroviario - Wikipedia - “[http://it.wikipedia.org/wiki/Blocco\\_ferroviano](http://it.wikipedia.org/wiki/Blocco_ferroviano)”
- [18] Blocco elettrico automatico a correnti codificate - Wikipedia -  
“[http://it.wikipedia.org/wiki/Blocco\\_automatico\\_a\\_correnti\\_codificate](http://it.wikipedia.org/wiki/Blocco_automatico_a_correnti_codificate)”
- [19] Blocco elettrico automatico a circuiti di binario - Wikipedia -  
“[http://it.wikipedia.org/wiki/Blocco\\_automatico\\_a\\_circuiti\\_di\\_binario](http://it.wikipedia.org/wiki/Blocco_automatico_a_circuiti_di_binario)”

- [20] Blocco automatico - Wikipedia – [“https://it.wikipedia.org/wiki/Blocco\\_Automatico”](https://it.wikipedia.org/wiki/Blocco_Automatico)
- [21] Sezione di blocco – Wikipedia – [“https://it.wikipedia.org/wiki/Sezione\\_di\\_blocco”](https://it.wikipedia.org/wiki/Sezione_di_blocco)
- [22] Documentazione tecnica - Documentazione tecnica - RFI -  
[“http://www.rfi.it/cms/v/index.jsp?vgnextoid=84e1668d15b2b110VgnVCM1000003f16f90aRCRD”](http://www.rfi.it/cms/v/index.jsp?vgnextoid=84e1668d15b2b110VgnVCM1000003f16f90aRCRD)
- [23] The European Railway Traffic Management System - [“http://www.ertms.net/”](http://www.ertms.net/)
- [24] Europa Press release – Valutazione intermedia dei progetti del programma pluriennale 2007-2013 per la rete TEN-T - [“http://europa.eu/rapid/press-release\\_MEMO-10-526\\_it.htm”](http://europa.eu/rapid/press-release_MEMO-10-526_it.htm)
- [25] EUROPA - The ERTMS in 10 questions - [“http://europa.eu/rapid/press-release\\_MEMO-05-235\\_en.htm”](http://europa.eu/rapid/press-release_MEMO-05-235_en.htm)
- [26] Realizzazione del sistema di segnalamento ferroviario ERTMS/ETCS -  
[“http://europa.eu/legislation\\_summaries/transport/rail\\_transport/l24458\\_it.htm”](http://europa.eu/legislation_summaries/transport/rail_transport/l24458_it.htm)
- [27] GNSS Project Portfolio, European GNSS Agency - [“http://www.gsa.europa.eu/r-d/gnss-project-portfolio”](http://www.gsa.europa.eu/r-d/gnss-project-portfolio)
- [28] Grail2 - [“http://grail2.ineco.es/Grail2/html/main.jsp”](http://grail2.ineco.es/Grail2/html/main.jsp)
- [29] INTEGRAIL - GNSS-1, ESA - [“http://www.esa.int/Our\\_Activities/Navigation/INTEGRAIL\\_-\\_GNSS-1\\_Rail\\_User\\_Navigation\\_Equipment”](http://www.esa.int/Our_Activities/Navigation/INTEGRAIL_-_GNSS-1_Rail_User_Navigation_Equipment)
- [30] Ferrovia in “Enciclopedia Italiana - IV Appendice -  
[“http://www.treccani.it/enciclopedia/ferrovia\\_res-6ffacdf-87e9-11dc-8e9d-0016357eee51\\_\(Enciclopedia-Italiana\)/”](http://www.treccani.it/enciclopedia/ferrovia_res-6ffacdf-87e9-11dc-8e9d-0016357eee51_(Enciclopedia-Italiana)/)
- [31] Segnali Ferroviari Italiani - Il sito non ufficiale sulla segnaletica ferroviaria italiana -  
[“http://www.segnalifs.it/”](http://www.segnalifs.it/)
- [32] UIC - International Union of Railways - [“http://www.uic.org/”](http://www.uic.org/)
- [33] ERTMS - ECM spa - [“http://www.ecmre.com/it/ertms.xhtml”](http://www.ecmre.com/it/ertms.xhtml)
- [34] ERA - [“http://www.era.europa.eu/”](http://www.era.europa.eu/)
- [35] ERTMS/ETCS: incontro con Fabio Senesi - YouTube –  
[“http://www.youtube.com/watch?v=oCwPAp-1ogE”](http://www.youtube.com/watch?v=oCwPAp-1ogE)
- [36] ERTMS – FS – [“http://www.fsitaliane.it/cms-file/allegati/rfi/ERTMSStotale.pdf”](http://www.fsitaliane.it/cms-file/allegati/rfi/ERTMSStotale.pdf)
- [37] Applicazioni ERTMS su linee convenzionali RFI – cifi –  
[“http://www.cifi.it/UplDocumenti/CIFI%20ERTMS%20ETCS%20%20BOLOGNA.pdf”](http://www.cifi.it/UplDocumenti/CIFI%20ERTMS%20ETCS%20%20BOLOGNA.pdf)
- [38] Trasporti ferroviari – Univeristà di Pisa –  
[“http://www2.ing.unipi.it/~a006048/trasporti\\_ferroviani\\_parteC\\_livorno\\_10-11\\_260511.pdf”](http://www2.ing.unipi.it/~a006048/trasporti_ferroviani_parteC_livorno_10-11_260511.pdf)
- [39] Circuiti di Binario - leferrovie.it –  
[“http://www.leferrovie.it/leferrovie/wiki/doku.php?id=app:imp\\_blocco\\_2”](http://www.leferrovie.it/leferrovie/wiki/doku.php?id=app:imp_blocco_2)

- [40] Ecopassenger – [“www.ecopassenger.com”](http://www.ecopassenger.com)
- [41] Blocco elettrico automatico – leferrovie.it –  
[“http://www.leferrovie.it/leferrovie/wiki/doku.php?id=app:imp\\_blocco\\_4”](http://www.leferrovie.it/leferrovie/wiki/doku.php?id=app:imp_blocco_4)
- [42] Sistema di distanziamento treni – segnalifs.it – [“http://www.segnalifs.it/it/bl/N\\_blocchi.htm#top”](http://www.segnalifs.it/it/bl/N_blocchi.htm#top)
- [43] Regolamento segnali FS – miol.it – [“http://www.miol.it/stagniwweb/segnali.htm#punto21”](http://www.miol.it/stagniwweb/segnali.htm#punto21)
- [44] Circuito Binario – Wikipedia – [“https://it.wikipedia.org/wiki/Circuito\\_di\\_binario”](https://it.wikipedia.org/wiki/Circuito_di_binario)
- [45] I circuiti di binario – segnalifs.it – [“http://www.segnalifs.it/it/ac/N\\_cdb.htm”](http://www.segnalifs.it/it/ac/N_cdb.htm)
- [46] Infrastruttura ferroviaria – università di Pavia-  
[“http://www3.unipv.it/electric/cad/prove\\_princ\\_appl/TecnicaFerroviaria.pdf”](http://www3.unipv.it/electric/cad/prove_princ_appl/TecnicaFerroviaria.pdf)
- [47] Circuito Binario – railwaytechnology –  
[“http://www.railwaytechnology.it/SST/Segnalamento/CdB.html”](http://www.railwaytechnology.it/SST/Segnalamento/CdB.html)
- [48] Sistemi di controllo per l’alta velocità ferroviaria – archivio mondodigitale – [“http://archivio-mondodigitale.aicanet.net/Rivista/10\\_numero\\_4/Flammini\\_p\\_18\\_32.pdf”](http://archivio-mondodigitale.aicanet.net/Rivista/10_numero_4/Flammini_p_18_32.pdf)
- [49] ERTMS/ETCS – intermodale24-rail – [“http://www.intermodale24-rail.net/Esercizio/ETCS-applicazioni.html2”](http://www.intermodale24-rail.net/Esercizio/ETCS-applicazioni.html2)
- [50] SSC – trenitalia –  
[“http://www.trenitalia.com/cmsfile/allegati/rfi/05\\_Volume\\_2\\_allegato\\_3\\_tipologici.pdf”](http://www.trenitalia.com/cmsfile/allegati/rfi/05_Volume_2_allegato_3_tipologici.pdf)
- [51] SSC – RFI – [“http://www.rfi.it/cms-file/allegati/rfi/Descrizione\\_del\\_Progetto\\_ssc.pdf”](http://www.rfi.it/cms-file/allegati/rfi/Descrizione_del_Progetto_ssc.pdf)
- [52] SCMT – segnalifs – [“http://www.segnalifs.it/it/sa/N\\_scmt.htm”](http://www.segnalifs.it/it/sa/N_scmt.htm)
- [53] SCMT – YOUTUBE- [“https://www.youtube.com/watch?v=M-Ed\\_5n5q7w”](https://www.youtube.com/watch?v=M-Ed_5n5q7w)